


ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРХНІХ ШАРІВ АТМОСФЕРИ

Ю. В. Шабатура¹, В. В. Атаманюк¹, Л. Я. Паращук¹, Г. В. Лунькова¹, В. Д. Смичок¹ , О. М. Бурнаєв²

¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
кафедра електромеханіки та електроніки, вул. Героїв Майдану,
32, Львів, 79012, Україна, e-mail: smychok@ukr.net

²Львівський Національний аграрний університет

(Отримано 30 вересня 2019 р.; в остаточному вигляді — 24 січня 2020 р.; прийнято до друку — 27 січня 2020 р.;
опубліковано онлайн — 02 квітня 2020 р.)

Дослідження стосуються розділу фізики атмосфери, зокрема процесів, які відбуваються у верхніх шарах атмосфери. Основною його метою є виявлення кореляційних залежностей фізичних величин на модулі відновлених утрачених даних у вертикальному профілі в атмосфері на висотах до 30 км. На основі проведених досліджень створено алгоритми відновлення втрачених даних та перетворення електрофізичних величин (сигналів) у числове (метеорологічне) значення параметрів фізики атмосфери.

Ключові слова: аерологія, алгоритм, атмосфера, вологість, опорна частота, радіозонд, радіосигнал, телеметрія, температура, фільтрація.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.1904>

I. ВСТУП

У статті викладено експериментальні дані вивчення фізичних процесів у верхніх шарах атмосфери. Методом зондування верхніх шарів атмосфери досліджено проблему відновлення втрачених даних фізичних величин процесів, які відбуваються у вертикальному профілі верхніх шарів атмосфери. Експериментальні дані вимірювання фізичних величин, як-от: температура, відносна вологість, атмосферний тиск, напрям та швидкість вітру — телеметричним радіоканалом метеорологічного радіозонда передавали до наземної радіолокаційної станції. Під час дослідження вимірюваних значень фізичних величин виникла проблема відсутності втрачених даних, яка вважалась незворотною. В статті описано основні фізичні властивості радіосигналів радіотехнічної системи метеорологічний радіолокатор-зонд. Головний акцент сконцентровано на проблемі крайніх точок даних у перехідних процесах у момент зникнення та появи сигналу телеметрії.

Вивченням цих проблем займалися: В. А. Прусов і А. Ю. Дорошенко [1], Е. Дж. Геймсфілд [2], А. Р. Бестужин *та ін.* [3], В. М. Шпиг, Л. В. Паламарчук, К. В. Гуда [4], В. А. Іванов *та ін.* [5], О. М. Бурнаєв [8]. Інженерні дослідження відновлення даних забезпечують розв'язання задач із достатньою для синоптичних прогнозів точністю, однак не враховують усіх особливостей і фізичних процесів, що відбуваються у вільній атмосфері, а виконують їх із недостатньою для оперативного прийняття рішення швидкістю [1].

З огляду на це, актуальною проблемою є розробка засобів автоматичної обробки даних фізичних процесів, що включає електрофізичні сигнали аналогового й цифрового типу, а також створення спеціального програмного забезпечення із застосуванням елементів штучного інтелекту. Поставлена задача не може бути розв'язана без попереднього дослідження різнома-

нітних фізичних характеристик вхідних сигналів вимірювальних систем, їхньої динамічності, включно із засобами доступу до оброблюваної інформації на всіх стадіях її проходження з метою оперативного контролю й математичного моделювання процесу [2].

Під час вимірювання фізичних неелектричних величин електричними методами виникає проблема передачі на значні віддалі показів первинних перетворювачів, сигнали яких в аналогових каналах зв'язку найчастіше мають низьку потужність та малий діапазон зміни корисного сигналу, який може бути сильно спотворений або частково втрачений. Серед засобів, що дозволяють передавати на значні віддалі телеметричну інформацію про стан динамічних об'єктів, найдешевшим за собівартістю можна вважати імпульсний аналоговий метод передачі даних, який і використовується у вітчизняних системах зондування верхніх шарів атмосфери.

Він полягає в тому, що певна фізична величина вимірюється первинним перетворювачем, який змінює свої електричні характеристики і впливає на частоту переривань постійно діючого генератора, що працює у фіксованій вузькій смузі частот, які транслює радіоканал.

Фізичні характеристики атмосфери Землі на висотах зондування до 30 км увесь час змінюють свої параметри з висотою в динаміці вертикальної та горизонтальної компонент польоту радіозонда. Залежно від зовнішніх (внутрішніх) фізичних чинників: розряду батарей, зміни зовнішньої температури й тиску у вільній атмосфері тощо. Для контролю стабільності роботи електричних схем, призначених для компенсації фізичних відхилень, по чергово з корисним сигналом тим же каналом зв'язку передають опорні сигнали, що транслюються від спеціально виділених стабільних давачів. Їхню фізичну величину називають опорною частотою. Корисних сигналів може бути декілька, протоколом передачі даних вони надходять у певній послідовності, чергуючись між собою та

з опорним сигналом. Тривалість кожного із сигналів задається наперед, проте в динаміці вони змінюється під впливом зовнішніх чинників. Відношення частоти кожного з корисних сигналів до значення опорної ча-

стоти (завжди більшої за них) задається числом, меншим за одиницю, і за допомогою градування (рис. 1) дозволяє встановити реальне значення того чи іншого фізичного параметра [3].

0.0393 0.0661 0.1057 0.1605 0.2308 0.3145 0.4063 0.4997 0.5881 0.6670 0.7342 0.7894 0.8336 0.8685 0.8958
 -90 -80 -70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50

$$K_V := \begin{pmatrix} 0.9311 & 0.9010 & 0.8711 & 0.8412 & 0.8112 & 0.7807 & 0.7492 & 0.7158 & 0.6787 & 0.6314 & 0.5555 \\ 100 & 90 & 80 & 70 & 60 & 50 & 40 & 30 & 20 & 10 & 4 \end{pmatrix}^T$$

Рис. 1. Створені в MathCad градувальні показники сенсора температури ММТ-1 та сенсора вологості аерологічного радіозонда МРЗ, де: дані 0.0393–0.8958 – коефіцієнти $K_T = f_T/F_{OP}$, а 0.9311–0.5555 – коефіцієнти $K_V = f_V/F_{OP}$ відповідно.

II. АЛГОРИТМИ ВІДНОВЛЕННЯ ВТРАЧЕНИХ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

A. Формування неперервного масиву через лінійну інтерполяцію між крайніми точками відрізків відсутності даних фізичних величин

У процесі радіозондування атмосфери результати передаються випромінювальною антеною радіозонда, що має тороподібну діаграму спрямованості. Дослідження показали, що під час передачі телеметричної інформації регулярно трапляються випадки пропадання каналу зв'язку, що призводить до втрати частини імпульсів і зменшення миттєвої частоти телеметрії, яка вимірюється підрахунком надходження імпульсів протягом певного періоду часу. Причинами переривання корисного сигналу можуть бути коливання радіозонду на підвищі оболонки, потужна турбулентність під час проходженні тропопаузи, відхилення діаграми спрямованості антени від напрямку на зонд, спричи-

нені поривами приземного вітру, які компенсуються автосупроводом лише з запізненням.

Перехідні фізичні процеси виникають також під час перемикання каналів телеметрії, оскільки в аналоговому зонді момент перемикання ніяк не пов'язаний з кодом, що передається. Вказані перешкоди короткочасні і тривають частки секунди. Натомість можливе повне пропадання сигналу внаслідок втрати автосупроводу, проходження зонда через закрити зону (за малих кутів місця внаслідок великого віддалення зонда) з деревами, висотними будівлями, тимчасового вимкнення живлення реєструвального обладнання, його збою тощо [3].

Для усунення таких недоліків у момент пропадання телеметрії відсутні значення поновлюються інтерполяцією проміжних даних, що не допускає великих стрибків даних під час поновлення, заданого формулою (1). При цьому оптимально використовувати програмний пакет із вбудованими функціями MathCad.

$$\begin{aligned}
 \text{Dani} := & \left\{ \begin{array}{l} f \text{ if } \text{rows}(f) - 1 = \max(f^{(0)}) - \min(f^{(0)}) \\ \text{otherwise} \\ \quad t \leftarrow f^{(0)} \\ \quad F1 \leftarrow f^{(1)} \\ \quad F2 \leftarrow f^{(2)} \\ \quad F4 \leftarrow f^{(4)} \\ \quad F5 \leftarrow f^{(5)} \\ \quad \text{MiN} \leftarrow \min(t) \\ \quad \text{for } j \in \text{min}(t) .. \text{max}(t) \\ \quad \quad T_{j-\text{MiN}} \leftarrow j \\ \quad \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ \quad F1 \leftarrow \text{cei}(\text{linterp}(t, F1, T)) \\ \quad \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ \quad F2 \leftarrow \text{cei}(\text{linterp}(t, F2, T)) \\ \quad \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ \quad F3 \leftarrow T \cdot 0 \\ \quad \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ \quad F4 \leftarrow \text{cei}(\text{linterp}(t, F4, T)) \\ \quad \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ \quad F5 \leftarrow \text{cei}(\text{linterp}(t, F5, T)) \\ \quad f \leftarrow \text{augment}(\text{augment}(\text{augment}(\text{augment}(\text{augment}(T, F1), F2), F3), F4), F5) \end{array} \right. \quad (1)
 \end{aligned}$$

У формулах (1)–(7): i — лічильник циклу; R — вектор (векторизована функція); H — висота; OOS — масив з двох векторів-претендентів; через \in вказано діапазон значень параметрів циклу; $\{ \dots \}$, блок команд виконує повторний прохід по вже фільтрованому масиву точок претендентів на значення особливої точки; F — частота блоку телеметричної інформації; f — частота посекуnderної реєстрації; F_{OP} — опорна частота.

За наявності пропусків у даних (див. рис. 2) формула (1) формує на основі дослідного файлу щосекундної реєстрації даних телеметрії та положення антени локатора неперервний масив лінійною інтерполяцією

між крайніми точками відрізків відсутності даних.

Ця процедура неприпустима лише для графіка температури в момент проходження радіозондом тропопаузи, у всіх інших випадках автоматично дає задовільні результати.

В (1) наведено один із численних фізичних експериментів з цифрової реєстрації польоту зонда, де в діапазоні висот від 15 до 20 км був відсутній сигнал телеметрії та контролю (опорної частоти). Як видно, звичайна інтерполяція від останньої зареєстрованої на висоті 15 км точки до першої після 20 км позитивних результатів не дає.

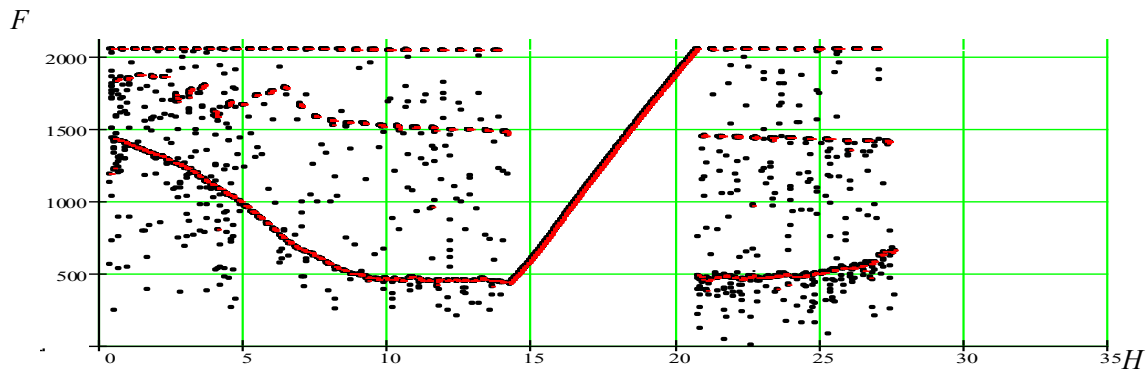


Рис. 2. Графік зареєстрованих нерозділених телеметричних частот з пропуском значень, які первинний реєстратор помилково інтерполював прямою лінією з'єднанням каналу опорної частоти з каналом частоти даних температури. Тут F — частота телеметричного каналу даних, Гц, H — висота радіозонда, км.

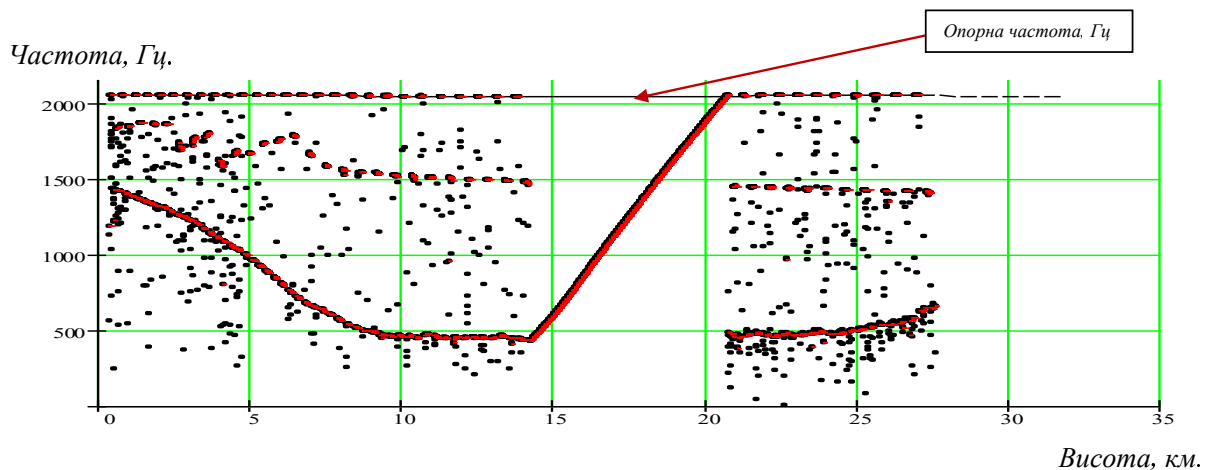


Рис. 3. Первинні дані (*) з нанесеною лінією розрізненого опорного сигналу показано стрілкою, зокрема в ділянці відсутності телеметрії на висоті 15–20 км.

Як видно з рис. 2, дані є значно зашумленими, проте візуально можна розрізнити три чіткі смуги точок, що відповідають (згори донизу) опорній частоті, частотам вологості та температури. Рівень шуму значний особливо наприкінці зондування, на висотах після 20 км за значного віддалення радіозонда та зниження рівня сигналу. На нижньому графіку спостерігається “обсипання” точок, пов'язане з пропаданням частини імпульсів протягом часу їх підрахунку. Дуже складним є становище зі сигналом вологості на поча-

тковій стадії дослідження-зондування, до проходження рівня хмарності [4]. Тут візуально відтворити графік на фоні перешкод сигналу практично неможливо. Це можна зробити лише розглянутими далі цифровими методами з урахуванням послідовності різних каналів телеметрії [6].

Перед виконанням процедури (2) необхідно мати фізичні параметри температури та вологості без поправок, які знаходимо на основі графіка на рис. 2 і 3.

В. Знаходження опорної частоти в заданих межах для випадку, коли в межі цих фізичних величин випадково потрапляє і корисний сигнал

Сутність запропонованого алгоритму полягає в тому, щоб спершу з усіх частот виділити опорну, що характеризується відносною стабільністю та розміщенням частот у межах 1980–2060 Гц, заданих нормативними документами на радіозонд. Якщо опорна частота виходить за ці межі, дані зондування бракуються.

Оскільки за відомчим нормативом частота корисного сигналу не може наближатися до опорної ближче за певну межу, це також є характерною ознакою, яка використовується для розпізнавання корисної і опорної частот. Отже, для знаходження опорної частоти сигнал насамперед повинен потрапляти в зада-

ні (нормативні) межі. Коли ж у ці межі випадково потрапляє і корисний сигнал, виконується процедура набором команд алгоритму (3).

Алгоритм знаходження опорної частоти в межах заданих нормативними характеристиками радіозондів наведено в (2), де H — висота польоту радіозонда, δT — межі періоду опорної частоти, D — дані (частоти), σ — опорна частота, R (вектор) — масиву даних опорної частоти по всій висоті зондування (рис. 3). Проте трапляються випадки, коли фізичні параметри радіозондів (частота генерації) виходять за межі технічних нормативів, а також викиди параметрів, які відкидають за допомогою перевірки з використанням функцій нелінійного згладжування та умови гладкості кривої сигналу. Ступінь гладкості вибирається під час атестації алгоритму (4).

$$\Delta T(D, \delta, R) := \left\{ \begin{array}{l} H \leftarrow 0 \text{ if } (\delta < -40) + (\delta > 40) \\ \text{otherwise} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} AN \leftarrow 0 \\ DN \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 1..49 \\ \quad \text{if } (\delta \leq R_{0,k}) \cdot (\delta > R_{0,k+1}) \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} AN \leftarrow k \\ \text{break} \end{array} \right. \\ \text{for } j \in 1..27 \\ \quad \text{if } (D \leq R_{j,0}) \cdot (D > R_{j+1,0}) \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} DN \leftarrow j \\ \text{break} \end{array} \right. \\ H1 \leftarrow R_{DN,AN} + \left(\frac{\delta - R_{0,AN}}{R_{0,AN+1} - R_{0,AN}} \right) \cdot (R_{DN,AN+1} - R_{DN,AN}) \\ H2 \leftarrow R_{DN+1,AN} + \left(\frac{\delta - R_{0,AN}}{R_{0,AN+1} - R_{0,AN}} \right) \cdot (R_{DN+1,AN+1} - R_{DN+1,AN}) \\ H \leftarrow H1 + \left(\frac{D - R_{DN,0}}{R_{DN+1,0} - R_{DN,0}} \right) \cdot (H2 - H1) \\ H \leftarrow 0 \text{ if } (H > 9) + (H < 0) \\ H \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

$$F_OP := \left\{ \begin{array}{l} F_OP \leftarrow 0 \\ k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(t) - 1 \\ \quad \text{if } (F_i > 2000) \cdot (F_i < 2160) \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} F_OP_{k,0} \leftarrow t_i \\ F_OP_{k,1} \leftarrow F_i \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \\ F_OP \leftarrow \left(\begin{array}{c} F_OP \langle 0 \rangle \\ \text{medsmooth}(F_OP \langle 1 \rangle, 111) \end{array} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

Набір команд (3) проводить первинну фільтрацію даних опорної частоти за ознакою потрапляння значень у нормативні межі.

Дані, що залишились після фільтрації, згладжуються вбудованою функцією MathCad (4) за медіаною, параметр якої (111 точок усереднення) встановлений численними експериментами над даними різних випусків і придатний практично для довільно спотворених даних [5].

$$\begin{aligned}
 F_OP := & \left\{ \begin{array}{l} F_OP1 \leftarrow 0 \\ k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(F_OP_0) - 40 \\ \quad \text{if } \left[\left| (F_OP1)_i - (F_OP1)_{i+39} \right| < 2\bar{0} \right] \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} F_OP1_{k,0} \leftarrow (F_OP_0)_i \\ F_OP1_{k,1} \leftarrow (F_OP1)_i \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \\ k \leftarrow k - 1 \\ \text{for } i \in \text{length}(F_OP_0) - 39.. \text{length}(F_OP_0) - 1 \\ \quad \text{if } \left[\left| (F_OP1)_i - (F_OP1)_{i-39} \right| < 2\bar{0} \right] \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} F_OP1_{k,0} \leftarrow (F_OP_0)_i \\ F_OP1_{k,1} \leftarrow (F_OP1)_i \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \\ F_OP1 \leftarrow \left(\begin{array}{c} F_OP1 \langle 0 \rangle \\ \text{medsmooth}(F_OP1 \langle 1 \rangle, 111) \end{array} \right) \end{array} \right. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Отриманий масив даних опорної частоти F_{OP} є проміжним, він не враховує втрачених унаслідок шуму точок, що перебувають у близькому околі нормативної смуги. В наступних процедурах пошуку корисних сигналів необхідно точно знати часові межі початку та завершення передачі опорної частоти. Нехтування втраченими точками або “захоплення” частот корисного сигналу, що потрапили у смугу опорної частоти, призводить до незадовільних результатів. Тому наступним обов’язковим кроком є “відсів” точок, що сильно різняться за значенням від сусідніх (наступних чи попередніх або через кілька секундних інтервалів). Дослідження показали, що такий фільтр є найбільш ефективним для порівняння точок опорної частоти, віддалених на 40 с одна від одної (4). Отриманий результат знову згладжується. Результат виділення опорної частоти показано на рис. 3, причому вона встановлена також на проміжку пропадання сигналу на висотах 15...20 км.

С. Процедура згладжування результатів виділених фізичних каналів

У телеметричному каналі сигнали циклічно йдуть у послідовності “опорна частота — температура — вологість — температура — опорна...”, тобто температура вимірюється й передається вдвічі частіше, ніж вологість та опорна частота. З огляду на те, що сучасні

радіозонди не мають чітких часових меж перемикання каналів і ці межі змінюються в польоті зонда як унаслідок зовнішніх чинників, так і розряду батарей, простим шляхом відновлення каналів температури та вологості є поділ на три частини часового проміжку між закінченням одного із сигналів опорної частоти та початком наступного. При цьому необхідно “викинути” певну кількість точок на границях сигналів, щоб позбутися викидів від перемикання каналів та можливої нерівномірності в часі перемикання каналів.

Процедура (5) визначає на основі відомих часових інтервалів наявності опорного сигналу частоти всіх інших корисних сигналів, що мають наперед обумовлену послідовність і тривалість, які в процесі роботи можуть бути спотворені.

Під час перемикання вимірювальних каналів виникають апаратні “збійні” точки в телеметрії, тому кінці відрізків, близькі в часі до точок перемикання, з розгляду виключені, а величини відкинутих відрізків встановлюються дослідним шляхом під час налаштування програми [5].

Крім наведеного вище, процедура (5) наприкінці проводить згладжування результатів розділення фізичних каналів. При цьому принципи роботи застосованих послідовно один за одним убудованих згладжувальних алгоритмів мови Mathcad залишаються невідомими, а керувальні параметри згладження дібрані на основі численних експериментів і можуть вважати-

ся для проблем атмосферного зондування універсальними. Відмова від запропонованого кінцевого згладження дає в результаті незадовільні наслідки, що робить

практично неможливим перенесення цього алгоритму на іншу мову програмування без консультацій з авторами Mathcad щодо суті використаних процедур.

$$\Gamma V(\Delta) := \left(\begin{array}{l} T \leftarrow 0 \\ V \leftarrow 0 \\ wT \leftarrow 0 \\ wV \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0.. \text{length}(\text{start}) - 1 \\ \quad \text{if } (\text{start}_k > 0) \cdot (\text{stop}_k - \text{start}_k > 12) \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} \text{num} \leftarrow \text{floor}\left(\frac{\text{stop}_k - \text{start}_k + 1}{3}\right) \\ \text{for } j \in \Delta.. \text{num} - \Delta \\ \quad \text{if } \left| f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j}} - f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j-1}} \right| < 7 \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} T_{wT,0} \leftarrow \text{start}_k + j \\ T_{wT,1} \leftarrow f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j}} \\ wT \leftarrow wT + 1 \end{array} \right. \\ \quad \text{for } j \in 2 \cdot \text{num} + \Delta.. 3 \cdot \text{num} - \Delta \\ \quad \quad \text{if } \left| f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j}} - f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j-1}} \right| < 7 \\ \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} T_{wT,0} \leftarrow \text{start}_k + j \\ T_{wT,1} \leftarrow f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j}} \\ wT \leftarrow wT + 1 \end{array} \right. \\ \quad \quad \text{for } j \in \text{num} + \Delta.. 2 \cdot \text{num} - \Delta \\ \quad \quad \quad \text{if } \left| f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j}} - f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j-1}} \right| < 15 \\ \quad \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} V_{wV,0} \leftarrow \text{start}_k + j \\ V_{wV,1} \leftarrow f_{\text{Num}_{\text{start}_k+j}} \\ wV \leftarrow wV + 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \\ T \leftarrow \left(\begin{array}{c} T \langle 0 \rangle \\ \text{ksmooth} \left(T \langle 0 \rangle, \text{medsmooth} \left(T \langle 1 \rangle, 19 \right), 17 \right) \end{array} \right) \\ V \leftarrow \left(\begin{array}{c} V \langle 0 \rangle \\ \text{ksmooth} \left(V \langle 0 \rangle, \text{medsmooth} \left(V \langle 1 \rangle, 17 \right), 17 \right) \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} T \\ V \end{array} \right) \end{array} \right) \tag{5}$$

Убудованими в MathCad алгоритмами процедура (5) проводить згладжування результатів і розділення фізичних каналів [4].

D. Процедура перетворення електрофізичних величин у числове (метеорологічне) значення параметрів фізики атмосфери

Наступним кроком є робота з первинними розділеними даними з метою їх подальшої фільтрації, відкидання шумів, процедура (6). Зокрема, захоплення даних від інших каналів, поновлення втрачених точок під час “обрізання” кінців відрізків. Критеріями для пошуку втрачених даних та для відбракування наявних є їхня відстань (у герцах) від опорної частоти, від частоти сигналу вологості та заборона різних зламів і стрибків на кривій температури (внаслідок

“перехоплення” частоти іншого сигналу під час зміщення). “Захоплюються” також близькі до попередньо розпізнаних точки, якщо вони одночасно далекі від частот інших сигналів [6]. Потрібно також додати ймовірність відсутності в кількох циклах сигналу опорної частоти, що могло б викликати поділ відрізка між двома опорними на три зі стрибками в даних. Особливу увагу приділено також початковій стадії польоту зонда, коли частоти температури і вологості є близькими.

Опрацювання первинних розділених даних з метою їх подальшої фільтрації, відкидання шумів виконується процедурою (6).

$$\begin{array}{l}
 T := \left| \begin{array}{l}
 R \leftarrow 0 \\
 k \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 0.. \text{End} \\
 \text{if } [|(\text{interp}(T_0, T_1, t_i) - f_i)| < 45] \cdot [|(\text{interp}(V_0, V_1, t_i) - f_i)| > 5] \cdot [|(\text{interp}(F_OP_0, F_OP_1, t_i) - f_i)| > 10] \\
 \left| \begin{array}{l}
 R_{k,0} \leftarrow t_i \\
 R_{k,1} \leftarrow f_i \\
 k \leftarrow k + 1
 \end{array} \right. \\
 R \leftarrow \left(\begin{array}{c}
 R \langle 0 \rangle \\
 \text{medsmooth}(R \langle 1 \rangle, 21)
 \end{array} \right)
 \end{array} \right. \quad (6)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 T := \left| \begin{array}{l}
 k \leftarrow 0 \\
 z \leftarrow 0 \\
 G0 \leftarrow 0 \\
 G1 \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 0.. \text{length}(T_0) - 2 \\
 \left| \begin{array}{l}
 G0_k \leftarrow (T_0)_i \\
 G1_k \leftarrow (T_1)_i \\
 k \leftarrow k + 1 \\
 \text{if } [(T_0)_{i+1} - (T_0)_i] > 1 \\
 \left| \begin{array}{l}
 \text{if } k > 3 \\
 \left| \begin{array}{l}
 R0_z \leftarrow \text{ceil}(\text{median}(G0)) \\
 R1_z \leftarrow \text{median}(G1) \\
 z \leftarrow z + 1
 \end{array} \right. \\
 G0 \leftarrow 0 \\
 G1 \leftarrow 0 \\
 k \leftarrow 0
 \end{array} \right. \\
 \left(\begin{array}{c}
 R0 \\
 R1
 \end{array} \right)
 \end{array} \right. \quad (7)
 \end{array}
 \end{array}$$

На основі знайденої частоти температури процедури (7) проводять контроль відповідності точок показам температури. Контроль здійснюється перевіркою близькості сусідніх у часі точок і заборонаю різких зламів у кривій температури, що фізично неможливо. Усі підозрілі точки автоматично відбраковуються та замінюються інтерполяцією, результати обов'язково підлягають згладжуванню, проте з суттєво меншим за опорну частоту кроком усереднення, дібраним експериментально.

Процедура (7) групує близькі в часі точки появи телеметричного каналу температури й усереднює ці блоки за їхньою медіаною (а не за середнім значенням), що дозволяє ефективно уникати різких викидів, які можуть залишитися від попередніх цифрових фільтрів. Результат виконання останніх процедур із (6) видно на рис. 4, причому потрібно додати, що, незважаючи на видиму складність алгоритму, жоден із наявних у ньому компонентів не може бути ліквідованим, оскільки це відразу призводить до незадовільних результатів, що легко помітні навіть візуально.

Як видно з рис. 4, лінії успішно повторюють усі коливання трьох графіків, прийнятих у послідовному каналі без міток перемикання пристроїв. За відсутності сигналу всі три криві успішно інтерпольовані, чому не стала перешкодою навіть початкова груба інтерполяція під час реєстрації даних [7].

Первинні телеметричні дані (чорні крапки) та розпізнані канали температури, вологості та опорної частоти (суцільні лінії) з урахуванням відновлених пропусків за відсутності сигналу [8].

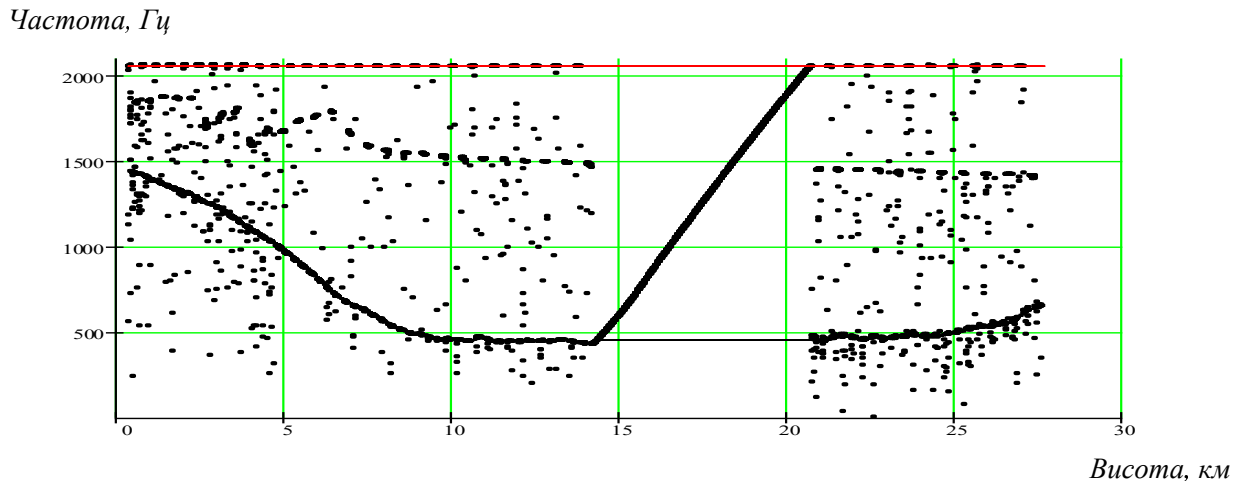


Рис. 4. Лінії на всіх коливаннях трьох графіків, прийнятих у послідовному каналі телеметричної інформації.

III. ВИСНОВКИ

У результаті роботи розв'язано задачу відновлення втрачених даних фізичних — електричних величин сигналів у каналі телеметричної інформації метеорологічного радіозонда та переведення їх у фізичні — метеорологічні величини під час дослідження фізичних характеристик верхніх шарів атмосфери. При цьому створено алгоритми відновлення втрачених даних. Запропонований набір алгоритмів дозволив повністю автоматизувати відділення каналів телеметричного сигналу та частково відновити втрачені дані. Апробація цього алгоритму на численних дистанційних експериментах дала змогу усунути всі недоліки, виявити практично всі можливі випадки некоректної роботи алгоритму та ліквідувати можливість їх появи. Наведений алгоритм подано в остаточному вигляді, що дає найоптимальніші результати за наближення кривої довільного динамічного експерименту

ламаною з найменшою кількістю точок та фіксованим рівнем максимального відхилення від реальних фізичних значень.

Розглянуті в процесі роботи інші підходи до алгоритмізації процесу відновлення даних виявилися не лише повільними, оскільки вимагають численних проходів по всіх точках, але й дефектними за змістом, бо не встановлюють усіх глобальних максимумів. Запропонована методика є одним із ключових елементів програмної частини апаратно-програмного комплексу, що проходив випробування від 2013 року і рекомендований до впровадження на аерологічній мережі України. Накопичено великий досвід опрацювання даних, що дозволив внести в алгоритм обов'язкові елементи, які видаються надлишковими, але спрацьовують у позаштатних ситуаціях, та спростити його до наведеного вище вигляду без втрати надійності опрацювання даних.

-
- [1] В. А. Прусов, А. Ю. Дорошенко, *Фізичні і математичні моделі, чисельні методи аналізу і прогнозу природних та техногенних процесів в атмосфері* (Наукова думка, Київ, 2006).
- [2] A. J. Heymsfield, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **47**, 135 (2008); <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1606.1>.
- [3] A. R. Bestugin *et al.*, *Air Traffic Control Automated Systems* (Springer, Singapore, 2020); <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9386-0>.
- [4] В. М. Шпиг, Л. В. Паламарчук, К. В. Гуда, *Гідролог. гідрохім. гідроекол.* **2**, 118 (2015).
- [5] V. A. Ivanov *et al.*, in *2012 22nd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"* (IEEE, 2012), p. 3.
- [6] Upper Air Observing System; <https://www.rts-wx.com/about-upper-air-observing-system>.
- [7] F. P. da Silva *et al.*, *Meteorol. Atmos. Phys.* **132**, 297 (2020); <https://doi.org/10.1007/s00703-019-00688-3>.
- [8] В. Смичок, О. Бурнаєв, *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.* **36**, 206 (2009).

**RESTORATION OF THE DATA OF PHYSICAL PROCESSES IN STUDIES
OF THE UPPER AIR ATMOSPHERE**

Y. Shabaturo¹, V. Atamanyuk¹, L. Parashchuk¹, H. Lunkova¹, V. Smychok¹, A. Burnayev²

¹*Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy Lviv, Ukraine*

Department of Electromechanics and Electronics,

e-mail: smychok@ukr.net

²*Lviv National Agrarian University*

The studies belong to the area of atmospheric physics, in particular the processes that occur in the upper atmosphere. The main purpose of the study is to find the correlation dependences of the physical quantities on the module of the lost data in the vertical profile in the atmosphere at altitudes up to 30 km.

The article presents the experimental data of the study of the physical processes of the upper atmosphere. The problem of the recovery of the lost data of physical quantities of processes occurring in the vertical profile of the upper atmosphere is investigated. The studies were carried out by the method of probing the upper atmosphere. Experimental physical measurement data such as temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind direction and velocity were transmitted to a ground-based radar by a telemetry radio channel of a meteorological radiosonde.

In the study of the measured values of physical quantities, there was a problem of missing data, which was considered irreversible. The basic physical properties of radio signals of the radio engineering system are investigated using the meteorological radar probe. The main focus is on the problem of data endpoints in transients at the time of disappearance and the appearance of telemetry.

Based on the conducted research, we have created algorithms for the recovery of lost data and the transformation of physical electrical quantities into values from atmospheric physics (meteorological-physical quantities).