

1. Perkins C.E. *Ad Hoc networking* // Addison Wesley Professional, Dec. 2000. 2. Jubin J. and Tornow J.D. *The DARPA Packet Radio Network protocol*. Proc. IEEE, vol. 15, no. 1, 1987. 3. IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – IEEE 802.11*, 1997. 4. HiperLAN2 Global Forum. URL: www.hiperlan2.com. 5. Abdul-Rahman A. and Hailes S. *A Distributed Trust Model*. New Security Paradigms Workshop 1997, ACM, 1997. 6. Stajano F. *The Resurrecting Duckling – what next? The 8th International Workshop on Security Protocols, LNCS 1796*, Springer-Verlag, 2000. 7. Jiang T. and Baras J. S. *Ant-based Adaptive Trust Evidence Distribution in MANET* // Proc. Of 2nd Intl. Workshop on Mobile Distributed Computing, Tokyo, Japan, 588-593, 2004. 8. Gerck E. *Generalized Certification theory*. 1998. 9. Gerck E. *Toward Real-World Models of Trust: Reliance on Received Information*, 2002.

УДК 621.791

С.Ю. Спіченков

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій

МЕТОДИКА ОБРОБКИ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ У РЕАЛЬНОМУ МАСШТАБІ ЧАСУ ТА АЛГОРИТМ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

© Спіченков С.Ю., 2005

Розглянуто методику багатоканальної обробки хвильових полів у реальному масштабі часу для виділення інформативних параметрів сигналу із шумів та їхньої оцінки для визначення координат джерела сигналу. Запропоновано алгоритм локалізації об’єкта, що випромінює шуми, в досліджуваному об’ємі.

The technique of multichannel wave field processing in real-time mode for signal informative parameters extraction from the noise and their evaluation in order to determine the coordinates of signal source is examined. The algorithm for localization of noise emitting source in the analyzed space is given.

Вступ. Розвиток засобів діагностики, вимірювальних телеметричних систем супроводжується щораз вищими вимогами до їхніх якісних характеристик і, особливо, прагненням забезпечити підвищену завадостійкість [4,5]. Перспективними в цьому плані є системи багатоканальної обробки інформації. Нині такі системи розробляють і застосовують в різних галузях науки і техніки, окрім діагностики складних технічних об’єктів, у гідролокації, сейсморозвідці, радіолокації і радіонавігації, радіоастрономії, розпізнаванні образів.

Огляд літературних джерел. Зацікавленість до багатоканальних систем викликана тим, що вони дають змогу отримувати додаткову інформацію про об’єкт дослідження, закладену у формі хвильового фронту. У таких системах, якщо відомі координати елементів, що реєструють хвильове поле, аналіз часу запізнення надходження хвилі на елементи, що приймають, дає змогу однозначно визначати координати аномалій у контрольованому об’єкті як у пасивному, так і у активному режимах. Більш того, у разі активної системи існує можливість однозначно визначати координати об’єкта навіть тоді, коли форма зондувального сигналу апріорі не відома. Використання системою багатоканальної обробки інформації про кривину фронтів дає змогу також розділяти інтерферуючі хвилі, наприклад, відбиті і дифраговані, що несе додаткову інформацію при аналізі структури (форми) відбиваючого (випромінюючого) поля аномалії. Серед наукових праць, які стосуються цієї теми, можна виділити [1–3].

Часто, наприклад при визначенні координат просторово локалізованих джерел шумів, кривина хвильового фронту є єдиним інформативним параметром. Ефективність багатоканальних

систем обробки за наявності шумів, що перекривають сигнал за спектром і потужністю, зумовлена тим, що ці системи дають змогу побудувати алгоритм обробки, який забезпечує накопичення сигналу синфазно в кожній точці контрольованого об'єму і синфазно накопичувати сигнали, які стосуються різних часів реєстрації, що при достатньому часі спостереження або кількості сигналів обробки забезпечує виявлення–вимірювання координат аномалії із заданою вірогідністю в умовах детермінованих і випадкових перешкод, локалізованих або розподілених у контрольованому об'ємі [1–3].

Метою статті є розроблення методики багатоканальної обробки для виділення інформативних параметрів сигналу із шумів і їхньої оцінки з метою визначення координат ушкоджень, що супроводжуються випромінюванням випадкових сигналів. Будемо намагатися забезпечити оптимальну за вибраним критерієм обробку інформації.

Одним з поширених є критерій оцінки максимальної правдоподібності [1, 2, 5]:

$$\Lambda(\vec{A} \vec{B}) = F(S(t) | \vec{A} \vec{B}) / F(S(t) | \vec{B}), \quad (1)$$

де \vec{A} – набір інформативних за умовами конкретної задачі параметрів сигналу; \vec{B} – набір неінформативних параметрів сигналу (що у цій задачі є завадою); $F(S(t) | \vec{A}, \vec{B})$ – функціонал правдоподібності для реалізації сигналу $X(t)$, розрахований за сукупністю всіх інформативних і неінформативних параметрів сигналу:

$$\left\| \begin{array}{cccc} a_{11}b_{11}, & a_{21}b_{21}, & \dots, & a_{n1}b_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1m}b_{1m}, & a_{2m}b_{2m}, & \dots, & a_{nm}b_{nm} \end{array} \right\|,$$

$F(X(t) | B)$ – функціонал щільності ймовірності реалізації $U(t)$ у разі відсутності сигналу (тобто функціонал щільності ймовірності завади).

Класифікація зондувальних сигналів. Діагностика стану досліджуваної області простору полягає в зондуванні її за допомогою електромагнітних, акустичних, теплових та інших тест-сигналів й оцінки її стану за хвильовою картиною, зареєстрованою багатоканальною системою. Використовувані зондувальні тест-сигнали доволі різноманітні за структурою і набором інформативних параметрів. Усі вони можуть бути розділені в просторово-часовому сенсі на широко- та вузькосмугові. З погляду роздільної здатності й завадозахищеності перша група перспективніша.

Під просторово-часовим сигналом розуміють сигнал, який описується у просторово-часовій області функцією $U = U(x, y, z, t)$. У частотній області йому відповідає спектр $G(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \omega_t)$. Просторові частоти $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ є функцією часової частоти ω_t і залежать від швидкості поширення хвиль у середовищі:

$$\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 = \omega_t^2 / v^2. \quad (2)$$

Вузькосмуговим у просторово-часовому змісті буде сигнал, для якого інтервал кореляції істотно перевищує інтервал часу між моментами часу реєстрації його на найвіддаленіших один від одного каналах [2, 3], тобто

$$|U(\rho_{m1}, R) - U(\rho_{m2}, R)| / v \ll 1 / \Delta f_u, \quad (3)$$

де Δf_u – ширина спектра сигналу; ρ_{m1}, ρ_{m2} – радіус-вектори найвіддаленіших один від одного каналів m_1, m_2 ; v – швидкість поширення хвиль у середовищі; R – радіус-вектор джерела.

Вузькосмуговий сигнал звичайно характерний для дальньої зони (зони Френеля), при реєстрації сферичних хвиль, коли $R \gg \rho_{m1} - \rho_{m2} < \frac{\lambda}{16}$, тобто лінійні розміри реєструвальної системи L значно менші, ніж віддаль до джерела хвиль [1, 2].

Якщо нерівність (3) не виконується, сигнал є широкосмуговим у просторово-часовому сенсі, тобто:

$$\|u_i(t; x; y; z)\| = \left\| \begin{array}{c} U_1(t, x, y, z) \\ U_2(t, x, y, z) \\ \dots \\ U_n(t, x, y, z) \end{array} \right\|.$$

У такому разі необхідно компенсувати запізнювання сигналу (комплексної огинаючої) у каналах обробки.

Наведене вище визначення класу сигналів повною мірою справедливе для описання сигналів багатоканальних растрово-сканувальних систем обробки текстових, фотографічних і телевізійних зображень. У такому разі які швидкість поширення хвиль у виразі (2) виступає v_{ck} – швидкість сканування зображення, тобто швидкість переміщення зображення щодо приймальних сенсорів. Задача розпізнавання прямих ліній аналогічна обробці сферичних хвиль у дальній зоні, а задача виявлення окружності – визначенню джерела сферичних хвиль, розташованого в ближній зоні.

Методика визначення координат джерела сигналу. У загальному випадку визначення координат об'єкта, що розташований в зоні контролю, включає такі операції: обчислення операторів частотної, просторової фільтрації; нагромадження результатів обробки; оцінка результатів обробки за вибраним критерієм оптимальності.

Перетворення хвильового поля в точках $M_K(x_K, y_K, z_K)$ розташування приймальних сенсорів в електричний сигнал і обчислення оператора просторової фільтрації виконується відповідно до виразу

$$\bar{u}_K(t, x, y, z) = \int \bar{h}(x, y, z) \bar{q}(x, y, z, t) dx dy dz dt, \quad (4)$$

$$\bar{S}(x, y, z, t)$$

де $\bar{h}(x, y, z)$ – просторова чутливість сенсора; $\bar{q}(x, y, z, t)$ – реєстрований процес; $\bar{S}(x, y, z, t)$ – поверхня синфазності, яка описує хвильовий фронт.

Величина сигналу на виході сенсора K -го каналу $u_K(t, x, y, z) = u_{Ki}$ у поточний момент часу t_i визначається зваженою сумою сигналів, що прийшли у точку з координатами x_K, y_K, z_K із поверхні однакового запізнення $S(x, y, z, t_i) = S_i$.

Конфігурація поверхні S_i залежить від конфігурації джерела хвиль і властивостей середовища. Для точкового джерела хвиль за умови, що середовище ізотропне, поверхня S_i є сферою, а для випромінювальної поверхні кінцевих розмірів – еліпсоїдом.

Помітимо, що обчислення координат поверхні S_i згідно з виразом, заданим в декартовій системі, приводить до необхідності розв'язання трансцендентних рівнянь і вимагає значних витрат часу, тому що не дає змоги розпаралелювати процес обчислень. У результаті виникає необхідність робити ці розрахунки в машинному, а не реальному часі, тому що значення x, y, z є функцією часу і координат реєструвальних сенсорів. Так, для еліпсоїда:

$$\frac{x_{Ki}^2}{a^2} + \frac{y_{Ki}^2}{b^2} + \frac{z_{Ki}^2}{c^2} = 1, \quad (5)$$

де $x_{Ki}; y_{Ki}; z_{Ki} = F_{x,y,z}(x_{Ki}, y_{Ki}, z_{Ki}, t_i)$.

Для розрахунку всіх координат необхідно спочатку зафіксувати x_{Ki}, y_{Ki} і здійснити перебір за значеннями z , потім зафіксувати y_{Ki}, z_{Ki} і здійснити перебір за всіма x і, нарешті, зафіксувати координати x_{Ki}, z_{Ki} і здійснити перебір за всіма y . Це вимагає запам'ятовування всієї інформації, зареєстрованої системою прийому на всьому інтервалі зміни t .

Значні переваги дає методика переходу до параметричного запису рівняння поверхні $S_{ki}(x, y, z)$. Наприклад, для еліпсоїда одержимо [4]:

$$\begin{aligned} x_{Ki} &= a_{Ki} \sin \alpha \cos \beta, \\ y_{Ki} &= b_{Ki} \sin \alpha \sin \beta, \\ z_{Ki} &= c_{Ki} \cos \alpha, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\alpha \in \{0, 2\pi\}, \beta \in \{0, 2\pi\}$.

Тепер координати x_{Ki}, y_{Ki}, z_{Ki} можуть бути розраховані в поточний момент t_i – для всіх каналів рівнобійними обчислювальними пристроями, а саме обчислення адрес зводиться до однієї або двох операцій множення, якщо функції \sin та \cos задані таблично. Крім того, оскільки параметри α і β не залежать від моменту часу реєстрування сигналів, то для поточного $t_i = i\Delta t$ можна розрахувати всі можливі значення $S_i(x, y, z)$ для контрольованого обсягу у машинному часі, тобто за час дискретизації Δt . Інтервал Δt визначається з умови просторового розподілу сигналів, тому що поточний час входить однаковим співмножником у рівняння всіх координат. Можливість розпаралелювання обробки як за каналами, так і за координатами значно розширює спектр просторових частот, які обробляються у реальному часі.

У контрольованому обсязі перетинання всіх поверхонь S_i – визначає точки “фокусування” багатоканальної системи реєстрації.

Сигнали, які реєструють в поточний момент часу всіма каналами, розподіляють в загальному полі пам'яті. Адреси, за якими записують значення сигналів для кожного моменту часу, розраховують згідно з виразами, аналогічним (6). Адресація запису і читання для ситуації визначення трьох координат здійснюється триіндексним адресним масивом. Індксація адрес для всіх каналів однакова, тобто не залежить від координат сенсора каналу. Координати кожного сенсора враховують співмножниками a_{Ki}, b_{Ki}, c_{Ki} .

Отже, в ОЗП створюється об'ємна модель, що відображає в просторі координат шуканих параметрів часовий процес поширення хвиль в середовищі. Це досягається записом сигналів, що надійшли в теперішній момент часу t_i , на кожен сенсор з поверхні однакового запізнення (ПОЗ) S_i за всіма адресами, що відповідають моделі цієї поверхні.

Обчислення оператора $P(x, y, z)$ забезпечується підсумовуванням сигналів, які реєструються усіма сенсорами D_K у різний час t_{Ki} , у точках об'єму моделі з однаковими адресами ($A[x, y, z]$), пропорційними до координат центру хвильового фронту $S(x, y, z) = M_{Kx}$.

Код N з адресою (A_x, A_y, A_z) накопичений в комірках ОЗП, які створюють модель, слугує ознакою наявності джерела сигналу (аномалії) у точках досліджуваного простору $[x, y, z]$ і дорівнює:

$$\begin{aligned} N[A_x, A_y, A_z] &= \hat{u}_D(K_{-N}, t_N) + \hat{u}_D(K_{-N-1}, t_N) + \dots + \\ &+ u_1(K_{-1}, t_{-1}) + u_0(K_0, t_0) + u_1(K_1, t_1) + \dots + u_N(K_N, t_n) \end{aligned} \quad (7)$$

де A_{ai} – адресні поля інформативних параметрів $A\Delta(x, y, z)$.

Код $\bar{U}_D(K_i, t_i)$ – це дискретне значення сигналу, який реєструється K -м сенсором у момент часу t_i із всієї поверхні ПОЗ, що відповідає цьому часу t_i . Якщо в точці з координатами (x_i, y_i, z_i) розміщене джерело хвиль, сигнали $u_D(K_i, t)$ всіх сенсорів будуть містити, окрім шумів $\eta(x, y, z, t)$, інформативну складову:

$$u_D(K_i, t_i) = u_i(x, y, z, t, K_i) + \sum_{i=1}^K \eta(x, y, z, t_i). \quad (8)$$

Код $N[A_i]$, накопичений в комірни з адресою $A(x, y, z, i)$, буде відрізнятися від кодів, накопичених в інших комірках ОЗП, на величину, зумовлену внеском корисного сигналу:

$$u_{кор} = \sum_{K=-N}^N \hat{u}_D(K_i, t_i). \quad (9)$$

Співвідношення сигнал/шум $C / Ш$ буде дорівнювати:

$$C / Ш = \frac{2N\hat{u}_D(K_i, t_i)}{\sqrt{\sum_{K=-N}^N \eta^2(x_i, y_i, z_i)}}. \quad (10)$$

З (10) видно, що код, накопичений в комірни A_i , буде більшим від будь-якого з кодів, накопичених в іншому об'ємі моделі. Це твердження справедливе, якщо в досліджуваному об'ємі є лише одне джерело хвиль, а сигнали від інших точок цього простору представляються шумом. Якщо ж в досліджуваному просторі буде кілька локальних джерел хвиль, то його синтезована модель буде містити кілька екстремальних кодів. Їхні координати в моделі взаємно однозначно пов'язані з положенням джерел хвиль у досліджуваному об'ємі.

Розподіл амплітуд сигналу по об'єму моделі $[V]$ являє собою зафіксовану інтенсивність хвиль у кожній точці об'єму, яка може бути представлена часовою функцією $F_t(V)$ скануванням всього об'єму (тобто вибором значень кодів з комірок цього об'єму) послідовно з постійною швидкістю. Відповідно до виразу (2) просторові частоти будуть однозначно пов'язані з частотним спектром функції $F_t(V)$. Це дає змогу зробити аналіз об'єму моделі методами і засобами, призначеними для обробки часових процесів.

Відповідно до теорії виявлення такий аналіз містить у собі операції частотної фільтрації P_f і процедури оцінки за одним з критеріїв виявлення [1, 2, 3].

Частотна фільтрація функції часової розгортки об'єму моделі $F_t(V)$ полягає в обмеженні її просторового спектра в області частот, визначеній апріорними даними про фізичні властивості середовища, можливому розподілові в ній об'єктів, швидкості поширення хвиль тощо. Тому характеристики частотного фільтра вибирають з урахуванням конкретної практичної задачі.

Рішення про наявність об'єкта у цій точці $M(x_i, y_i, z_i)$ досліджуваного об'єму може бути отримане порівнянням амплітуди поточного значення сигналу на виході пристрою, що реалізує операцію частотної фільтрації P_f з порогом, розрахованим за одним з критеріїв оцінки, наприклад, максимальної правдоподібності (1). Значення порогу у такому разі отримують, розв'язуючи рівняння правдоподібності:

$$\left. \frac{\partial \ln P_{R/A}(R/A)}{\partial A} \right|_{A=\hat{a}_{mL/R}} = 0. \quad (11)$$

Приклад застосування розробленої методики обробки хвильових полів. Поширимо тепер процедуру визначення координат на випадок, коли чотири і більше параметрів хвильового поля, що визначаються одночасно, знаходять відображення в конфігурації поверхні S і для яких можуть бути отримані аналітичні рівняння.

У такому разі послідовність виконання операторів залишається незмінною. Тільки індексація масивів пам'яті стає чотиривимірною і більше, що вимагає визначення параметричного виразу, який зв'язує всі шукані параметри з поверхнею хвильового фронту S . Зберігаються всі переваги розробленої методики реалізації просторової фільтрації.

Як приклад розглянемо методику визначення координат об'єкта, що випромінює імпульсний сигнал, спектр якого обмежений смугою (30 ± 100) кГц, а огинаюча має дзвоноподібну форму і тривалість на рівні 0,1, що дорівнює $T_i = 1,5$ мс. Середовищу властива ізотропність за координатами (x, y, z) . Швидкість поширення хвиль у середовищі $U = 1500$ м/с. Координати джерела хвиль такі: $x = 150$ м; $y = 150$ м; $z = 1500$ м. Реєструюча система п'ятиканальна і являє собою хрестоподібну систему з центром координат у точці перетинання прямих. Координати сенсорів такі:

$$D_{x1} = [-150; 0; 0] \quad D_{x2} = [-0; 0; 0] \quad D_{x3} = [0; -150; 0] \quad D_{y2} = [0; -150; 0] \quad D_{y3} = [0; 150; 0]$$

Умовна схема реєстрації зображена на рисунку.

Очевидно, що при зазначених розмірах реєструючої системи сигнал є широкосмуговим у просторово-часовому сенсі, а його хвильовий фронт буде сферичним (тому що середовище ізотропне). Часова фаза хвильового фронту щодо центрального сенсора бази прийому легко визначається з умов геометричного опису поширення хвиль.

Для цього розташування джерела хвиль ці фази дорівнюють:

$$T(D_{x1}; D_{y1} \div q_{xyz}) = 10,25 \cdot 10^{-1} \text{ с},$$

$$T(D_{x2}; D_{y2} \div q_{xyz}) = 10,10 \cdot 10^{-1} \text{ с},$$

$$T(D_{x3}; D_{y3} \div \bar{q}_{xyz}) = 10,05 \cdot 10^{-1} \text{ с},$$

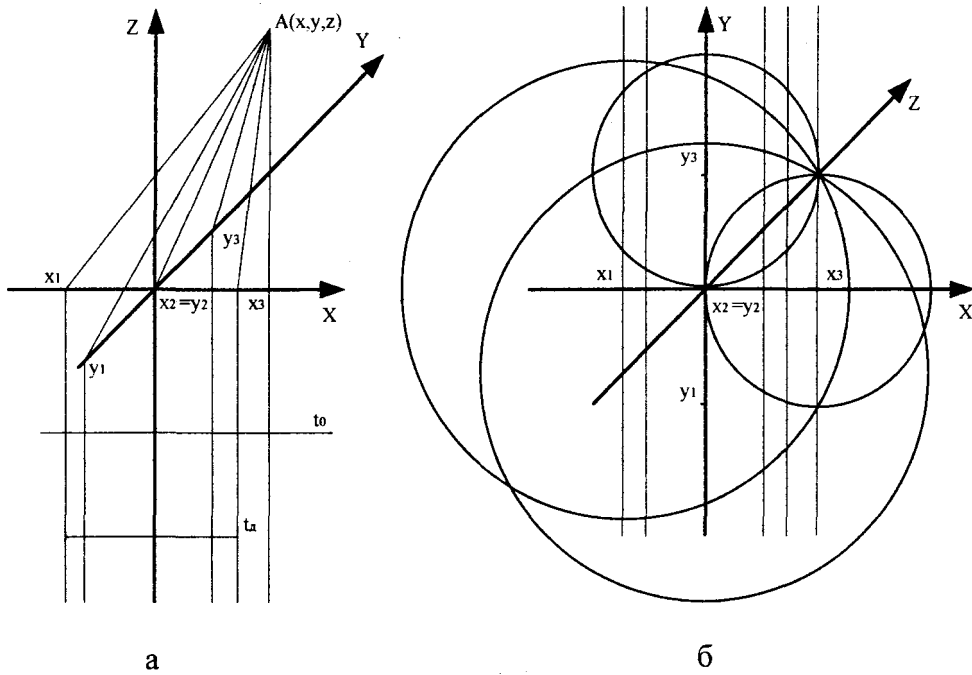
$$\Delta t(D_{x1}; D_{y1} \div D_{x2}) = 15,00 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$\Delta t(D_{x3}; D_{y3} \div D_{x2}) = 5,00 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

З рисунка видно, що затримка хвильового фронту має значну неузгодженість, і на перший погляд виникає думка, що ці неузгодженості можна компенсувати лише перебором, зміщуючи сигнали сенсорів один щодо одного. У дійсності затримки визначаються строго аналітично. Сферичні поверхні однакового запізнення, побудовані для кожного сенсора, перетнуться в точці з адресою $A_{xi}, A_{yi}, A_{zi} = M[A(x, y, z)]$. Область перетинання утворить об'єм ΔV_i , який є інтервалом розподілу системи за координатами x, y, z . Цей об'єм обмежений сферичними поверхнями, з центрами в точках $D_x \div D_y$, адресами сенсорів і радіусами, зумовленими швидкістю поширення хвиль і часом, на якому реєструють в цьому каналі хвильовий фронт. На рисунку б показаний перетин площиною X, O, Z сфер, побудованих для моментів часу t_{ki} , наведених у прикладі.

Неважко помітити, що поверхня, утворена сигналом у перетині $Z = 1500, X = 0, Y = 0$, є двовимірною взаємкореляційною функцією $(C_{x,y})|_{x=const}$ ансамблю сигналів сенсорів, глобальний максимум якої збігається з точкою цієї площини з координатами $X = 150, Y = 150$. При перетині моделі об'єму площинами $X = 150, Y = 0, Z = 0$ і $Y = 150, X = Z = 0$ утворяться відповідно двовимірні взаємкореляційні функції $(C_{z,y})|_{x=const}$ і $(C_{y,z})|_{y=const}$.

Сигнали всього утвореного об'єму являють собою тривимірну взаємкореляційну функцію $C_{x,y,z}$ ансамблю сигналів сенсорів, а координати її максимуму відповідають правильно підібраним часовим зміщенням сигналів $\Delta\tau$, які реєструються каналами прийому.



Умовна схема реєстрації сигналів

Роздільна здатність за координатами пропорційно залежить від параметрів хвильового фронту і різниці часів приходу (РЧП) фронту хвилі до сенсорів K_- і K_+ , тобто вона тим більша, чим більші лінійні розміри системи реєстрації.

Якщо збільшити розміри приймальної системи важко (у разі встановлення на рухомому об'єкті), то їх можна одержати штучно. Для цього, формуючи взаємкореляційну функцію в об'ємі адресного масиву, необхідно доповнювати його сигналами, одержуваними послідовно в часі з сенсора, що переміщується в просторі.

Позитивна властивість розглянутого методу визначення затримок для кожної точки досліджуваного об'єкта полягає в тому, що немає необхідності підбирати Δt послідовним перебором. Набір необхідних затримок для всього об'єму виходить автоматично при побудові моделі середовища, представленій адресним масивом сферичних поверхонь для кожного поточного моменту часу $t_i \in \{0, T\}$.

Важливо відзначити ще і ту обставину, що для визначення координат одного або групи сигналів немає необхідності реєструвати всю часову функцію $T \in \{D_x, D_y\}$ за всіма сенсорами. Достатньо утворити поточний об'єм з розмірністю $(-y_{\max}; y_{\max}); (-x_{\max}; x_{\max}); (z_i; z_i + \Delta z)$, де Δz залежить від часового запізнення хвилі, утвореної в точці з координатами $[-x, 0, z_i]$ відносно точки $[x, 0, z_i + \Delta t]$ за умови, що $L_x = L_y$, тобто Δz визначається РЧП хвилі до двох найвіддаленіших сенсорів приймаючої системи.

Цікаво відзначити, що розглянутий на прикладі визначення координат джерела хвиль алгоритм просторової фільтрації залишається незмінним і у разі прийому імпульсного сигналу, який випромінюється об'єктом із точки з координатами $M(x_0, y_0, z_0)$.

Алгоритм обробки не зазнає змін також у разі активної локації, коли сигнал випромінюється з будь-якої точки простору, наприклад, з центру бази прийому $M(0,0,0)$ і приймаються відбиті від об'єкта або дифраговані на об'єкті хвилі.

Розглянутий алгоритм дає також змогу локалізувати в досліджуваному об'ємі точкове джерело, що випромінює шуми. В об'ємі моделі по поверхнях ПОЗ розподіляють не поточні значення сигналу, а величину, пропорційну до спектральної щільності потужності.

Можливості алгоритму не обмежуються тільки знаходженням координат об'єкта. Він дає змогу визначати будь-які інші три параметри хвильового фронту, наприклад, швидкість поширення хвиль у середовищі і кутові координати об'єкта щодо реєструючої системи. Відмінність в обчисленнях операторів $P(L, \alpha, \beta)$, $P(x, y, z)$ і $P(L, \alpha, \beta)$ полягає в тому, що в першому випадку параметричні вирази для ПОЗ задаються в координатах X, Y, Z , а в другому – в координатах L, α, β . Крім того, є можливість розпізнавати об'єкти, що відрізняються один від одного за типом утворюваних ними хвиль (дифраговані, відбиті тощо), тому що кожному типу хвиль відповідають різні ПОЗ.

Особливо варто зазначити те, що картину розподілу об'єктів в просторі огляду отримують одразу всю, без механічного або електричного сканування досліджуваного простору фокусованою в точці діаграмою спрямованості всієї системи спостереження, що характерно для відомих систем обробки. Це стає можливим, оскільки розподіл сигналів сенсорів за розрахунковими адресами, які відповідають поверхням $S_i(t, x, y)$, автоматично фокусує приймальну систему у всіх точках досліджуваного об'єму. Необхідно тільки забезпечити однакову просторову чутливість приймальних елементів в межах кутів огляду.

Висновки. На закінчення необхідно відзначити, що розглянута методика може використовуватися також при аналізі складних хвильових полів, навіть якщо рівняння хвильового фронту важко одержати в явному вигляді, що зустрічається, наприклад, при діагностиці об'єктів складної форми. У такому разі, якщо очікувана форма досліджуваного об'єкта відома, можна описати хвильовий фронт, тобто задати поверхню S_i , методами кускової апроксимації. Після цього задача визначення локальних джерел хвиль розв'язується відповідно до описаної методики, причому якщо хвильовий фронт апроксимується кривими другого порядку, вдається забезпечити режим реального часу.

Розвиток результатів досліджень цієї статті можливий в напрямі вдосконалення методики аналізу складних хвильових полів навіть якщо рівняння хвильового фронту важко одержати в явному вигляді, а також побудови ефективніших алгоритмів багатоканальної обробки хвильових полів.

1. Ван-Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. – М., 1972–1977, т.1. 2. Пространственно-временная обработка сигналов / Под ред. И.Я. Кремера. – М., 1984. 3. Зверев В.А. Радионтика. – М., 1975. 4. Berdugo B., Doron M.A., Rosenhouse J., Azhari H. On Direction Finding of an Emitting Source from Time Delays. – 33 pp. - http://www.andraelectronics.com/pdf_files/DFTAwhite.pdf. 5. Rui Y., Florencio D. New Direct Approaches to Robust Sound Source Localization / Proc. of IEEE International Conf. on Multimedia Expo (ICME) 2003, Baltimore, MD, July 6-9, pp. 1: 737-740. - <http://www.research.microsoft.com/~yongrui/ps/icme03.pdf>.