УДК 621.325.5:621.382.049.77

О.В. Дробік[1], А.М. Косовець[2]

[1]*Державний університет телекомунікації, Київ*
[2]*Науково-виробниче підприємство “Квантор”, Київ*

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕРАГЕРЦОВОГО 3D-РАДАРА З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ТИПУ 1 (ІМ-1) В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ШУМІВ

У науковій лабораторії НВП «Квантор» були проведені дослідження побудованого ЛЧМ (лінійна частотна модуляція) радара з обмеженням у часі частоти биття від 3-х шарів відбиття. Відстані до шарів відбиття - 0,095 м, 0,105 м, 0,106 м. Побудована інтегральна модель неперервного сигналу биття на виході змішувача ЛЧМ-радара, яка в першому наближенні вважається моделлю гармонічного коливання з невідомими первинними параметрами. Наведений підхід дозволив оцінити всі три первинні параметри гармонійного коливання (частоту, фазу і амплітуду). Метод дав добрі результати в умовах значних шумів.

Вступ

Використання терагерцових 3D-радарів для неруйнівного контролю, як правило, проходить в умовах значних шумів. Це пов’язане з шумами нелінійних елементів системи, перевідбиття від елементів системи та зовнішньої оснастки, відбиття від інших шарів досліджуваного зразка. Вплив шуму на спотворення сигналу і кількісне оцінювання параметрів висвітлюється в даній статті.

1. Інтегральна модель типу 1 (ІМ-1)

Дослідимо ЛЧМ-радар з такими характеристиками: діапазон частот ЛЧМ - від 92 ГГц до 96 ГГц; період ЛЧМ (тривалість інтервалу спостережень) - 1 мс; розрядність АЦП - від 16 до 32 біт; кількість циклів накопичення - від 1 до 10000; кількість шарів відбиття - 3; відстані до шарів відбиття - 0,095 м, 0,105 м, 0,106 м; середа поширення хвиль - вакуум; відношення С/Ш - від 80 дБ до 30 дБ.

Сигнал биття на виході змішувача в ЛЧМ-радарі, для випадку відбиття від дзеркальної поверхні, розташованої на k-й відстані від випромінювача, який теоретично має бути гармонічним коливанням з частотою f_k, фазою φ_k і амплітудою U_k, на практиці є спотвореним різними факторами і далі буде називатися k-ю характеристичною функцією. Такий сигнал можна описати відповідною моделлю неперервного часу, яку в першому наближенні будемо вважати моделлю гармонічного коливання з невідомими первинними параметрами, а саме:

$$y_k(t) = U_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) = U_k \cos\varphi_k \cos\omega_k t + U_k \sin\varphi_k \sin\omega_k t = A_k \cos\omega_k t + B_k \sin\omega_k t, \quad (1)$$

де $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi / T_k$ - кругова частота коливання, [рад/с].

У дискретному часі (тобто на виході АЦП для моментів часу $t_n = nT_s$, де T_s - період дискрет) гармонічному коливанню (1) буде відповідати дискретний сигнал

$$y_k[n] = U_k \cos(\Omega_k n + \varphi_k) = A_k \cos\Omega_k n + B_k \sin\Omega_k n, \quad (2)$$

де $\Omega_k = 2\pi\omega_k / \omega_s = 2\pi T_s / T_k$ - відносна кругова частота коливання, [рад], $\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi / T_s$ - кругова частота дискретизації, [рад/с].

Аналіз впливу часу спостереження сигналів на зміну їх спектральних характеристик виконаємо для випадку ЛЧМ-радара фірми *Quantor* (м. Київ).

Оскільки $\Delta D_{\min} = 1\cdot 10^{-3}$ м, то

$$t_{D,\min} = \frac{2\Delta D_{\min}}{c} = \frac{2\cdot 1\cdot 10^{-3}}{3\cdot 10^{8}} = 6,6(6)\cdot 10^{-12} \text{ [с]},$$

$$\Delta f_{\min} = \frac{2\Delta f_i\, \Delta D_{\min}}{cT_i} = \frac{2\cdot 4\cdot 10^{9}\cdot 1\cdot 10^{-3}}{3\cdot 10^{8}\cdot 1\cdot 10^{-3}} = 26,6(6)$$

[Гц], отже:

- необхідна роздільна здатність за часом - 6,66 пс.
- необхідна роздільна здатність по частоті - 26,66 Гц.

Оскільки тривалість інтервалу спостереження сигналу становить $T_і = 10^{-3}$ с, то роздільна здатність класичних спектральним методів становить $\Delta f_{\min} \approx \frac{1}{T_і} = 10^3$ Гц. Отже, реалізувати за допомогою класичних методів спектрального аналізу необхідну роздільну здатність по частоті $\Delta f_{\min} = \frac{2\Delta f_і \, \Delta D_{\min}}{cT_і} = 26,6(6)$ Гц є неможливим.

При розробці моделі були зроблені припущення про однократне відбиття випромінюваного сигналу від кожного шару та умовний характер згасання сигналів (для полегшення аналізу результатів досліджень).

Окремі відбиття від кожного з трьох шарів створює на виході змішувача ЛЧМ-радара окремі сигнали биття з відповідною частотою, амплітудою і фазою, а спільно - суміш трьох сигналів биття.

Такий сигнал можна описати відповідною моделлю неперервного часу, яку в першому наближенні будемо вважати моделлю гармонічного коливанням з невідомими первинними параметрами, а саме:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{3} y_k(t) = \sum_{k=1}^{3} U_k \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (3)$$

де $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi / T_k$ - кругова частота коливання, [рад/с].

У дискретному часі (тобто на виході АЦП для моментів часу $t_n = nT_s$, де T_s - період дискрет) гармонічному коливанню (1) буде відповідати дискретний сигнал

$$y[n] = \sum_{k=1}^{3} y_k[n] = \sum_{k=1}^{3} U_k \cos(\Omega_k n + \varphi_k), \quad (4)$$

де $\Omega_k = 2\pi\omega_k / \omega_s = 2\pi T_s / T_k$ - відносна кругова частота коливання, [рад], $\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi / T_s$ - кругова частота дискретизації, [рад/с].

Відповідно зробленим припущенням, частоти гармонічних коливань, які відповідають відстаням відбиття 0,095 м, 0,105 м, 0,106 м є такими:

$f_1 = 2533,33$ Гц, $f_2 = 2800,00$ Гц,

$f_3 = 2826,67$ Гц.

Для моделі (1), а саме:

$y_k(t) = U_k \cos(\omega_k t + \varphi_k)$, можна навести таку узагальнену формулу для s- кратного застосування операції інтегрування:

$$y_k^{(s+)}(t) = \begin{cases} (-1^{s/2}) \dfrac{1}{\omega_k^s} y_k^{(0+)}(t) - \sum\limits_{i=1}^{s} \dfrac{t^{s-i} U_k}{\omega_k^i} \cos(\varphi_k - \dfrac{i\pi}{2}), \; s = 2m \\ (-1^{(s-1)/2}) \dfrac{1}{\omega_k^{s-1}} y_k^{(1+)}(t) - \sum\limits_{i=1}^{s-1} \dfrac{t^{s-i} U_k}{\omega_k^i} \cos(\varphi_k - \dfrac{i\pi}{2}), \; s = 2m+1 \end{cases}, \; m = 1, 2, \ldots, \quad (3)$$

де $y_k^{(0+)}(t) = y_k(t)$ гармонічна модель (30) для k-ї характеристичної функції, $y_k^{(1+)}(t) = \int_0^t y_k(t)dt$ - результат однократного інтегрування гармонічної моделі (1), $y_k^{(s+)}(t) = \underbrace{\int_0^t \ldots \int_0^t \int_0^t}_{s} y_k(t) dt dt \ldots dt$ - результат s - кратного інтегрування гармонічної моделі (1).

У дискретному варіанті вираз (45) буде виглядати так:

$$y_k^{(s+)}[n] = \begin{cases} (-1^{s/2}) \dfrac{1}{\omega_k^s} y_k^{(0+)}[n] - \sum\limits_{i=1}^{s} \dfrac{(nT_s)^{s-i} U_k}{\omega_k^i} \cos(\varphi_k - \dfrac{i\pi}{2}), \; s = 2m \\ (-1^{(s-1)/2}) \dfrac{1}{\omega_k^{s-1}} y_k^{(1+)}[n] - \sum\limits_{i=1}^{s-1} \dfrac{(nT_s)^{s-i} U_k}{\omega_k^i} \cos(\varphi_k - \dfrac{i\pi}{2}), \; s = 2m+1 \end{cases}, \; m = 1, 2, \ldots,$$

де $\omega_k{}^i = \Omega_k^i / T_s{}^i$, $y_k^{(0+)}[n] = y_k[n]$, $y_k^{(1+)}[n] = T_s \sum_{i=0}^{n} y[n]$, $y_k^{(s+)}[n] = T_s^s \underbrace{\sum_{n=0}^{n} \ldots \sum_{n=0}^{n} \sum_{n=0}^{n}}_{s} y_k[n]$.

Тоді
$$y_k^{(s+)}[n] = \begin{cases} (-1^{s/2}) \dfrac{T_s^s}{\Omega_k^s} y_k[n] - T_s^s \sum\limits_{i=1}^{s} \dfrac{n^{s-i} U_k}{\Omega_k^i} \cos(\varphi_k - \dfrac{i\pi}{2}), \; s = 2m \\ (-1^{(s-1)/2}) \dfrac{T_s^s}{\Omega_k^{s-1}} \sum\limits_{i=0}^{n} y_k[i] - T_s^s \sum\limits_{i=1}^{s-1} \dfrac{n^{s-i} U_k}{\Omega_k^i} \cos(\varphi_k - \dfrac{i\pi}{2}), \; s = 2m+1 \end{cases}, \; m = 1, 2, \ldots \quad (5)$$

2. Рівняння спостереження

З виразу (4) можна отримати рівняння спостереження $\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{E}_k$ для інтегральної моделі типу 1, яке буде виглядати так:

$$\frac{1}{T_s^s} \begin{bmatrix} y_k^{(s+)}[n_1] \\ y_k^{(s+)}[n_2] \\ \ldots \\ y_k^{(s+)}[n_N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-1^{s/2}) y_k[n_1] & -1 & \ldots & -\dfrac{n_1{}^{s-4}}{(s-4)!} & -\dfrac{n_1{}^{s-3}}{(s-3)!} & -\dfrac{n_1{}^{s-2}}{(s-2)!} & -\dfrac{n_1{}^{s-1}}{(s-1)!} \\ (-1^{s/2}) y_k[n_2] & -1 & \ldots & -\dfrac{n_2{}^{s-4}}{(s-4)!} & -\dfrac{n_2{}^{s-3}}{(s-3)!} & -\dfrac{n_2{}^{s-2}}{(s-2)!} & -\dfrac{n_2{}^{s-1}}{(s-1)!} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ (-1^{s/2}) y_k[n_N] & -1 & \ldots & -\dfrac{n_N{}^{s-4}}{(s-4)!} & -\dfrac{n_N{}^{s-3}}{(s-3)!} & -\dfrac{n_N{}^{s-2}}{(s-2)!} & -\dfrac{n_N{}^{s-1}}{(s-1)!} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\Omega_k^s} \\ \dfrac{U_k}{\Omega_k^s} \cos(\varphi_k - \dfrac{s\pi}{2}) \\ \ldots \\ +\dfrac{U_k}{\Omega_k^4} \cos\varphi_k \\ -\dfrac{U_k}{\Omega_k^3} \sin\varphi_k \\ -\dfrac{U_k}{\Omega_k^2} \cos\varphi_k \\ +\dfrac{U_k}{\Omega_k^1} \sin\varphi_k \end{bmatrix}_{s=2m} + \begin{bmatrix} \varepsilon_k[n_1] \\ \varepsilon_k[n_2] \\ \ldots \\ \varepsilon_k[n_N] \end{bmatrix} .(5)$$

3. Обчислення первинних параметрів моделі

Результатом розв'язання рівняння спостереження (5) є вектор оптимальних параметрів

$$\mathbf{X}_{opt} = \left[\frac{1}{\Omega_k^s}, \quad \frac{U_k}{\Omega_k^s} \cos(\varphi_k - \frac{s\pi}{2}), \quad \ldots, \quad +\frac{U_k}{\Omega_k^4} \cos\varphi_k, \quad -\frac{U_k}{\Omega_k^3} \sin\varphi_k, \quad -\frac{U_k}{\Omega_k^2} \cos\varphi_k, \quad +\frac{U_k}{\Omega_k^1} \sin\varphi_k \right]^{\mathrm{T}}, \text{ або}$$

$$\mathbf{X}_{opt}(1) = \frac{U_k}{\Omega_k^s},$$

$$\mathbf{X}_{opt}(m) = \frac{U_k}{\Omega_k^{s-(m-2)}} \cos(\varphi_k - \frac{(s-(m-2))\pi}{2}),$$

$$m = 2, 3, \ldots s+1 .$$

Отже, первинні параметри гармонічного коливання можуть бути визначені так:

$$\Omega_k = \sqrt[s]{\frac{1}{\mathbf{X}_{opt}(1)}},$$

$$\varphi_k = \arctan\left(-\frac{\mathbf{X}_{opt}(s+1)}{\Omega_k^1 \mathbf{X}_{opt}(s)} \right),$$

$$U_k = \left(-\frac{\Omega_k^2 \mathbf{X}_{opt}(s)}{\cos\varphi_k} + \frac{\Omega_k^1 \mathbf{X}_{opt}(s+1)}{\sin\varphi_k} \right) / 2$$

4. Результати експериментальних досліджень

У результаті експериментального дослідження було встановлено, що такий підхід до оцінювання первинних параметрів моделі гармонічного коливання з використанням інтегральної моделі типу 1 (ІМ-1) дає коректні результати навіть в умовах значних шумів. Для відношення сигнал/шум на рівні 35 дБ і менше спостерігаються незначні похибки оцінювання, які становлять не більше 0,2 % від точного значення частоти коливання, не більше 1 % від точного значення фази коливання і не більше 1 % від точного значення амплітуди коливання.

Результати оцінювання фази і амплітуди мають адитивну систематичну похибку, яка добре помітна при відношенні сигнал/шум на рівні 60 дБ і більше, рис. 1.

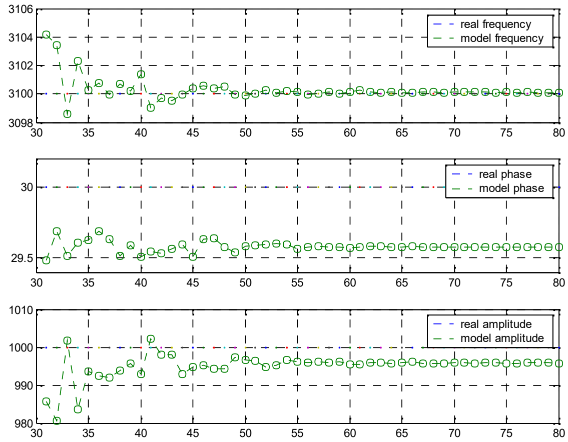

Рис. 1. Результат оцінювання параметрів гармонійних коливань $U_k \cdot \cos(\Omega_k n + \varphi_k)$ за моделлю IM-1

Висновки

Наведений підхід дозволяє оцінювати всі три первинних параметри гармонічного коливання (частоту, фазу і амплітуду), до того ж дає добрі результати в умовах значних шумів. Це пояснюється тим, що операції інтегрування зберігають інформацію про фазу коливання і придушують шумову складову.

Список літератури

1. *SynViewScan. 3D Terahertz / Millimeter Wave Imaging. — електрон. дані. — режим доступу: http://www.synview.com/download/DataSheet_SynViewScan_0810.pdf*
2. *Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Обработка сигналов в дискретном времени: Пер. с англ. С.А.Кулешова / Под ред. А.С.Ненашева. — М.: Техносфера, 2006. — 856 с., ил.*
3. *Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с. ил.*
4. *Шрюфер Е. Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів: Підручник / За ред. В. П. Бабака. — К.: Либідь, 1992, С. 51 — 55.*
5. *Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems / Transactions of the ASME — Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): 35 — 45. Copyright © 1960 by ASME.*

Надійшла до редколегії 12.11.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО 3D-РАДАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ТИПА 1 (ИМ-1) В УСЛОВИЯХ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ШУМОВ

А.В. Дробик, М.А. Косовец

В научной лаборатории НПП «Квантор» были проведены исследования изготовленного ЛЧМ (линейная частотная модуляция) радара с ограниченным во времени частоты биения от 3-х слоев отражения. Расстояния до слоев отражения — 0,095 м, 0,105 м, 0,106 м. Построена интегральная модель непрерывного сигнала биения на выходе смесителя ЛЧМ-радара, которая в первом приближении считается моделью гармонического колебания з неизвестными первичными параметрами. Приведенный поход позволил оценить все три первичных параметра гармонического колебания (частоту, фазу и амплитуду). Метод дал хорошие результаты в условиях значительных шумов.

RESARCH RESOLUTION TERAHERTZ 3D-RADAR USING INTEGRAL MODELS HARMONIC OSCILLATION TYPE (IM-1) WITH THE SIGNIFICANT NOISE

A.V. Drobyk, M.A. Kosovets

In the science lab SPE "Quantor" studies were conducted made FMCW (Frequency modulation continuous wave) radar with a limited time to the beat frequency of 3 layers of reflection. The distance to the reflection layers - 0,095 m, 0,105 m, 0,106 m. Built integrated model of continuous beat signal at the mixer output chirped FMCW radar, which in the first approximation is considered a model of harmonic oscillation with unknown primary parameters. We have a campaign allows us to evaluate the pouring-all three primary parameters of harmonic oscillations (frequency, phase and amplitude). Method gave good results in a significant noise.