УДК 621.391.26

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОГО ПРИСКОРЕННЯ ЦІЛІ ЗА РАХУНОК ВРАХУВАННЯ ФАЗОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ ПРИЙНЯТОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

М.М. МІНЕРВІН, О.Л. КУЗНЄЦОВ

У статті синтезовано алгоритм оптимального вимірювання радіального прискорення цілі, який враховує випадкові фазові викривлення прийнятих радіоімпульсів пачкового радіосигналу. Проаналізовано особливості запропонованого оптимального алгоритму.

Ключові слова: радіальне прискорення, частота, радіосигнал, фазові флуктуації.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні радіолокаційні станції (РЛС) окрім первинної обробки здійснюють вторинну обробку радіолокаційної інформації та забезпечують супроводження цілі. Необхідною умовою якісного супроводження є вимірювання похідних дальності до цілі за часом з необхідною точністю.

На практиці, як зондувальний сигнал РЛС широко використовується когерентна пачка радіоімпульсів. Реальні умови поширення і відбиття радіолокаційного сигналу є джерелом виникнення фазових флуктуацій, які порушують його когерентність та знижують якість обробки радіолокаційної інформації.

Аналіз, проведений у роботі [1], свідчить про необхідність врахування фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки під час вимірювання радіальної швидкості та радіального прискорення цілі. В роботі [2] проведено оптимізацію вимірювання радіальної швидкості цілі за рахунок врахування фазових флуктуацій радіоімпульсів пачки. Становить практичну користь проведення аналогічної оптимізації в ході вимірювання радіального прискорення цілі, що дозволить покращити якість вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Метою статті є проведення оптимізації вимірювання радіального прискорення цілі за рахунок врахування випадкових фазових викривлень прийнятого радіолокаційного сигналу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На вхід приймального пристрою РЛС надходить адитивна суміш відбитого від цілі корисного радіосигналу і некорельованого гаусівського внутрішнього шуму. Корисним радіосигналом є пачка радіоімпульсів з випадковою розподіленою за законом Релея амплітудою та випадковою розподіленою за рівномірним законом початковою фазою.

Радіальне прискорення цілі можна оцінити за допомогою виразу

$$\hat{a}_r = \lambda \hat{\dot{\Omega}} / 4\pi , \qquad (1)$$

де λ — довжина хвилі; $\hat{\dot{\Omega}} = 2\pi \hat{\dot{F}}_{д}$; $\hat{\dot{F}}_{д}$ — оцінка швидкості зміни частоти Доплера.

Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим середнім. При цьому задача регулярного вимірювання $\dot{\Omega}$ розв'язується пошуком аргументу максимуму логарифму відношення правдоподібності [3] згідно з виразом

$$\hat{\dot{\Omega}} = \arg\max \ln \ell(\dot{\Omega}) . \qquad (2)$$

Як показано в роботах [1] і [2] в умовах регулярного вимірювання (відношення сигнал/шум за потужністю $q^2 >> 1$) відношення правдоподібності визначається виразом

$$\ell \cong \frac{2}{q^2} \exp \frac{q^2 \rho^2}{2} , \qquad (3)$$

де ρ — нормована функція розузгодження за фазою спостережуваного і очікуваного сигналів.

Можна показати, що для когерентної пачки радіоімпульсів квадрат нормованої функції розузгодження від швидкості зміни частоти сигналу описується виразом

$$\rho^2(\dot{\Omega}) = -2\sum_{k=2}^{m}\sum_{l=1}^{k-1} \xi_l \xi_k [(S_k - S_l) - \\ -[k^2 - k - l^2 + l]\dot{\Omega} T^2 + (S_{\varphi k} - S_{\varphi l})]^2, \qquad (4)$$

де $S_k = \Phi_{m+1-k} + \Phi_{m+k}$ и $S_l = \Phi_{m+1-l} + \Phi_{m+l}$ — k -а і l -а суми початкових фаз радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки; $S_{\varphi k} = \varphi_{m+1-k} + \varphi_{m+k}$ и $S_{\varphi l} = \varphi_{m+1-l} + \varphi_{m+l}$ — k -а і l -а суми флуктуаційних складових початкових фаз радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки; k і l — номери пар радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки; m — кількість пар радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки; $\xi_k = \frac{Z_k}{Z_\Sigma}$; $Z_k = \frac{1}{2}\left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}_k(t) \dot{X}_k^*(t) dt \right|$ — модуль комплексного кореляційного інтегралу для k -ї пари радіоімпульсів; $\dot{Y}_k(t)$ — комплексна амплітуда прийнятого радіоімпульсу k -ї симетричної пари; $\dot{X}_k^*(t)$ — комплексно спряжена амплітуда опорного радіоімпульсу k -ї симетричної пари; $Z_\Sigma = \sum_{k=1}^{n} Z_k$; n — кількість радіоімпульсів у пачці; T — період слідування радіоімпульсів пачки.

Наявність у виразі (4) флуктуаційних складових сум фаз симетричних радіоімпульсів пачки обумовлює необхідність переходу до усередненого відношення правдоподібності

$$\overline{\ell}(\dot{\Omega}) = \int\limits_{(\vec{S}_\varphi)} \ell(\dot{\Omega}, \vec{S}_\varphi) p(\vec{S}_\varphi) \partial \vec{S}_\varphi , \qquad (5)$$

де $\vec{S}_\varphi = \| S_{\varphi k} \|$ — вектор-стовпець значень сум флуктуаційних складових фаз симетричних радіоімпульсів пачки; $p(\vec{S}_\varphi)$ — закон разподілу цих сум; $d\vec{S}_\varphi = (dS_{\varphi 1} dS_{\varphi 2} ... dS_{\varphi m})^T$.

Припускається, що фазові флуктуації розподілені за нормальним законом з кореляційною матрицею фазових флуктуацій виду

$$K = \left\| \sigma_\varphi^2 a^{|i-j|} \right\| \; i, \; j \in 1, \; 2, ..., \; n , \qquad (6)$$

де σ_φ^2 і a — дисперсія і коефіцієнт міжімпульсної кореляції фазових флуктуацій відповідно.

Можна показати, що щільність ймовірностей випадкових складових сум фаз симетричних радіоімпульсів пачки при $m \geq 2$ має такий вигляд

$$p(\vec{S}_\varphi) = \frac{\sqrt{1-a}}{(2\sqrt{2}\pi\sigma_\varphi)^m (1-a^2)^{m/2}} \times$$
$$\times \exp\left\{ -\frac{1}{4\sigma_\varphi^2 (1-a^2)} \left[S_{\varphi m}^2 + (1-a+a^2) S_{\varphi 1}^2 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + (1+a^2) \sum_{k=2}^{m-1} S_{\varphi k}^2 - 2a \sum_{k=1}^{m-1} S_{\varphi k} S_{\varphi k+1} \right] \right\}. \qquad (7)$$

З урахуванням (3), (4) і (7) усереднене відношення правдоподібності (5) приймає вигляд

$$\overline{\ell}(\dot{\Omega}) = K \int\limits_{(\vec{S}_\varphi)} \exp\left\{ -\frac{q^2}{2} (a_{1,1} S_{\varphi 1}^2 + a_{m,m} S_{\varphi m}^2 + \right.$$
$$+ \sum_{k=2}^{m-1} a_{k,k} S_{\varphi k}^2 + 2\sum_{k=1}^{m-1} a_{k,k+1} S_{\varphi k} S_{\varphi k+1} + 2\sum_{k=1}^{m} a_{k,m+1} S_{\varphi k} +$$
$$+ 2\sum_{k=1}^{m-2} \sum_{l=k+2}^{m} a_{k,l} S_{\varphi k} S_{\varphi l})] dS_{\varphi 1} dS_{\varphi 2} ... dS_{\varphi m} , \qquad (8)$$

де

$$K = \frac{2\sqrt{1-a}}{q^2 (2\sqrt{\pi}\sigma_\varphi)^m (1-a^2)^{m/2}} \exp\left\{ -\frac{q^2}{2} \sum_{k=2}^{m} \sum_{l=1}^{k-1} \xi_k \xi_l \delta S_{k,l}^2 \right\};$$

$$a_{1,1} = \frac{1-a+a^2}{2\gamma(1+a)} + \xi_1 \sum_{l=2}^{m} \xi_l ;$$

$$a_{m,m} = \frac{1}{2\gamma(1+a)} + \xi_m \sum_{l=1}^{m-1} \xi_l ;$$

$$a_{k,k} = \frac{1+a^2}{2\gamma(1+a)} + \xi_k \left(\sum_{l=1}^{k-1} \xi_l + \sum_{l=k+1}^{m} \xi_l \right) ;$$

$$a_{k,k+1} = a_{k+1,k} = -\frac{a}{2\gamma(1+a)} - \xi_k \xi_{k+1} ;$$

$$a_{k,m+1} = a_{m+1,k} = \xi_k \sum_{l=1}^{m} \xi_l \delta S_{k,l} ; \; a_{k,l} = a_{l,k} = -\xi_k \xi_l ;$$

$$\gamma = q^2 \sigma_\varphi^2 (1-a) ; \delta S_{k,l} = (S_k - S_l) - (k^2 - k - l^2 + l) \dot{\Omega} T^2 .$$

Для узяття інтегралу у виразі (8) показник експоненти необхідно призвести до вигляду

$$-\frac{q^2}{2} \left(\sum_{k=1}^{m} \lambda_k y_k^2 + \frac{|\Delta|}{|\Theta|} \right), \qquad (9)$$

де $|\Delta| = \begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & . & a_{1,m} & a_{1,m+1} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & . & a_{2,m} & a_{2,m+1} \\ . & . & . & . & . \\ a_{m,1} & a_{m,2} & . & a_{m,m} & a_{m,m+1} \\ a_{m+1,m} & a_{m+1,2} & . & a_{m+1,m} & 0 \end{vmatrix}$ — визначник матриці Δ коефіцієнтів квадратичної форми m змінних S_φ у показнику експоненти виразу (8); $|\Theta|$ — визначник матриці Θ при членах другого ступеня квадратичної форми; $\vec{y} = \| y_k \|$ — нові змінні; $\| \lambda_k \|$ — власні значення матриці Θ, отриманої з матриці Δ шляхом вилучення з неї $(m+1)$-го рядка та $(m+1)$-го стовпця.

Після приведення квадратичної форми до вигляду (9) і узяття інтегралу, усереднене відношення правдоподібності (5) приймає вигляд

$$\overline{\ell}(\dot{\Omega}) = \frac{K}{|\Theta|} \left(\sqrt{\frac{2\pi}{q^2}} \right)^m \exp\left(-\frac{q^2}{2} \frac{|\Delta|}{|\Theta|}\right) . \qquad (10)$$

Якщо перейти до натурального логарифму виразу (10) та залишити тільки залежні від вимірюваного параметра складові, можна отримати вираз для достатньої статистики

$$S(\dot{\Omega}) = -\frac{q^2}{2} \left[\sum_{k=2}^{m} \sum_{i=1}^{k-1} \xi_k \xi_i \delta S_{k,i}^2 - \frac{1}{|\Theta|} \times \right.$$
$$\left. \times \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{m} (-1)^k \xi_k \xi_l \delta S_{k,l} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} (-1)^i \xi_i \xi_j \delta S_{i,j} \left| \Theta_{k,i} \right| \right] . \qquad (11)$$

Згідно з (2), задача регулярного вимірювання зводиться до пошуку аргумента максимуму достатньої статистики (11)

$$\frac{\partial S(\dot{\Omega})}{\partial \dot{\Omega}} = 0 \quad \text{при} \quad \dot{\Omega} = \hat{\dot{\Omega}} . \qquad (12)$$

Розв'язання рівняння (12) можна подати у вигляді

$$\hat{\dot{\Omega}} = \frac{1}{T^2} \sum_{k=2}^{m} \sum_{i=1}^{k-1} g_{k,i} \frac{(S_k - S_i)}{(k^2 - k - i^2 + i)} . \qquad (13)$$

Таким чином, оптимальне оцінювання швидкості зміни частоти (радіального прискорення цілі) зводиться до вагового складання різниць сум фаз симетричних радіоімпульсів пачки.

Вагові коефіцієнти у (13) можуть бути оцінені згідно з виразом

$$g_{k,i} = (k^2 - k - i^2 + i) \xi_k \xi_i \frac{A_{k,i}}{B} , \qquad (14)$$

де $$A_{k,i} = (k^2 - k - i^2 + i) - \frac{1}{|\Theta|} \times$$

$$\times \left[\sum_{l=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} (-1)^l \xi_l \xi_j (l^2 - l - j^2 + j) ((-1)^k \Theta_{k,l} + (-1)^{i+1} \Theta_{i,l}) \right]$$

$$B=\sum_{k=2}^{m}\sum_{i=1}^{k-1}\xi_k\xi_i(k^2-k-i^2+i)^2-\frac{1}{|\Theta|}\times$$
$$\times\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}(-1)^k\xi_k\xi_l(k^2-k-l^2+l)\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}(-1)^i\ \xi_i\xi_j(i^2-$$
$$-i-j^2+j)\left|\Theta_{k,i}\right|.$$

Вагові коефіцієнти $g_{k,i}$ залежать від інтервалу $\left(k^2-k-i^2+i\right)T^2$ між відповідними симетричними радіоімпульсами пачки, амплітудних множників ξ_k і ξ_i та параметра $\gamma=q^2\sigma_\varphi^2(1-a)$, який дозволяє врахувати спільний вплив внутрішніх шумів і корельованих фазових флуктуацій.

На рис. 1 наведено графіки залежності вагових коефіцієнтів $g_{k,i}$ від значень параметра γ для пачки з шості радіоімпульсів з рівномірним розподілом амплітуд.

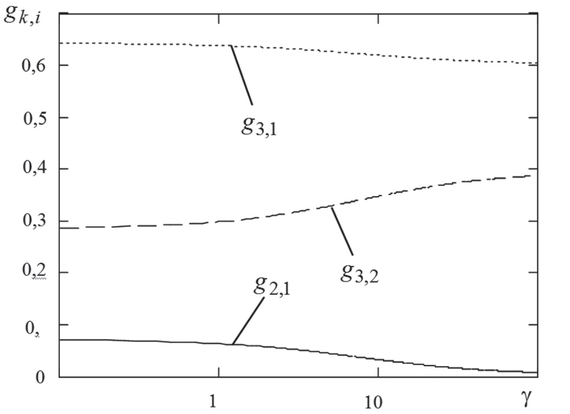

Рис. 1. Графіки залежності вагових коефіцієнтів $g_{k,i}$ від параметру γ

З графіків видно, що найбільші значення має ваговий коефіцієнт $g_{3,1}$, який відповідає різниці сум фаз симетричних радіоімпульсів крайньої і центральної пари, оскільки саме ця різниця робить основний внесок у точність вимірювання швидкості зміни частоти пачки. Менші значення приймає вага $g_{3,2}$, а мінімальні – $g_{2,1}$.

ВИСНОВКИ

Можна вважати, що для пачки з довільною кількістю радіоімпульсів з переважним впливом фазових флуктуацій ($\gamma>>1$) найбільших значень досягають вагові коефіцієнти, які відповідають різницям сум фаз симетричних радіоімпульсів крайньої та близьких до неї пар і центральної та близьких до неї пар.

Отримані результати можуть бути практично використані для підвищення якості вторинної обробки радіолокаційної інформації в сучасних РЛС, що забезпечують супроводження цілей.

Література

[1] *Минервин Н.Н. Кузнецов А.Л.* Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флюктуаций фаз импульсов пачки // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Харків: ХАІ – 2001. – Вип. 22. – С. 288–294.

[2] *Кузнецов А.Л. Минервин Н.Н., Шумейко И.Е., Таршин В.А.* Оптимальные алгоритмы измерения радиальной скорости цели и угла прихода принимаемого радиосигнала с учетом фазовых флуктуаций, описываемых произвольной корреляционной функцией. // Радиотехника. – Харків: ХНУРЕ. – № 145 – 2006. – С. 84-88.

[3] Радиоэлектронные системы. – Основы построения и теория./ под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.

Надійшла до редколегії 24.10.2013

Мінервін Микола Миколайович, фото та відомості про автора див. на стор. 486.

Кузнєцов Олександр Леонідович, фото та відомості про автора див. на стор. 505.

УДК 621.391.26

Оптимизация измерения радиального ускорения цели за счет учета фазовых флуктуаций принятого радиолокационного сигнала / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. – 2013. – Том 12. – № 4. – С. 518–520.

В статье синтезирован алгоритм оптимального измерения радиального ускорения цели, учитывающий случайные фазовые искажения принятых радиоимпульсов пачечного радиосигнала. Проанализированы особенности предложенного оптимального алгоритма.

Ключевые слова: радиальное ускорение, частота, радиосигнал, фазовые флуктуации.

Ил.: 1. Библиогр.: 3 назв.

UDC 621.391.26

Optimization of measuring target radial acceleration with due account of phase fluctuations of received radar signal / N.N. Minervin, A.L. Kuznetsov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2013. – Vol. 12. – № 4. – P. 518–520.

An algorithm of the optimum measurement of target radial acceleration that takes into account irregular phase distortions of received radio pulses of the train radio signal is synthesized in the paper. The peculiarities of the offered optimum algorithm are analysed.

Keywords: radial acceleration, frequency, radio signal, phase fluctuations.

Fig.: 1. Ref.: 3 items.