

МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕЙПОНА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕЛЕНГУ НА ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ СФЕРИЧНИХ ФРОНТАХ ЇХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У МІСЦІ ПРИЙОМУ

Авдєєнко Г.Л., Корсак В.В., Якорнов Є.А.
Інститут телекомунікаційних систем НТУУ «КПІ»
E-mail: yakornov@its.kpi.ua

Capon's algorithm modification for radiation source with spherical waves bearing angle estimation

Capon's algorithm of radiation source bearing angle estimation limitations are shown when radiation source located in the Fresnel's zone of the direction-finder antenna system. Modification of Capon's algorithm in order to determine bearing angle and distance to radiation source with spherical wave front from direction-finder antenna system are proposed.

Алгоритм Кейпона є одним з відомих алгоритмів пеленгації джерел радіовипромінювання (ДРВ) високої роздільної здатності [1]. Даний алгоритм передбачає обчислення функції вихідних сигналів лінійної антенної решітки (АР), на яку приходить електромагнітна хвиля (ЕМХ) з плоским фазовим фронтом (рис.1) і, зокрема, визначення пеленгу до джерела радіовипромінювання (ДРВ) за допомогою наступного базового співвідношення

$$V(\beta) = \frac{1}{F^2(\beta) \cdot \mathbf{S}_a^H(\beta) \cdot \mathbf{R}_{xx}^{-1}(\beta) \cdot \mathbf{S}_a(\beta)}, \quad (1)$$

де $F(\beta)$ – діаграма спрямованості окремого елемента АР (вважатимемо всі елементи АР ідентичними); $\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{x}^H(t)]$ – кореляційна матриця вхідних сигналів антенної решітки, які усереднені в часі;

$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & x_2(t) & \dots & x_N(t) \end{bmatrix}^H$ – вектор-стовпець вхідних сигналів антенної решітки; $\mathbf{S}_a(\beta)$ – управляючий вектор-стовбець антенної решітки; N – кількість елементів АР.

З урахуванням того, що Δx з рис.1 і набіги фаз, за рахунок різної відстані кожного елемента решітки до ДРВ будуть рівні

$$\Delta x = L \sin \beta \Rightarrow t_1 = \frac{\Delta x}{c} = \frac{L}{c} \sin \beta = \Delta \varphi, \text{ то вектор } \mathbf{S}_a(\beta) \text{ можна представити в}$$

вигляді

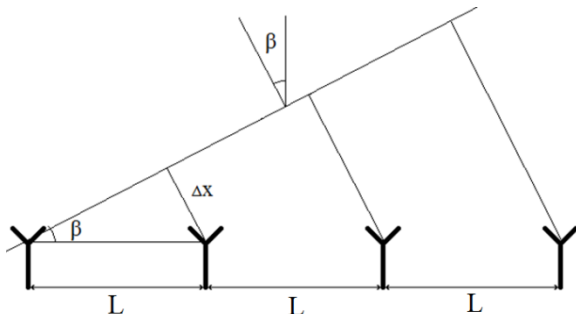


Рис.1 Лінійна АР та плоский фронт хвилі

$$\mathbf{S}_a(\beta) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j(2\pi L \sin \beta)/\lambda) \\ \vdots \\ \exp(-j((N-1)\pi L \sin \beta)/\lambda) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Як можна побачити з виразу (2) для плоского фазового фронту ЕМХ, управляючий вектор-стовбець $\mathbf{S}_a(\beta)$ функціонально залежить лише від кута приходу (пеленгу) ЕМХ β , а отже функція вихідних сигналів лінійної антенної решітки $V(\beta)$ також залежить лише від цього кута. Відповідно, побудувавши залежність $V(\beta)$, можливо по її максимумам отримати інформацію лише про пеленг до ДРВ.

Однак, для ряду практичних застосувань, коли ДРВ знаходиться в зоні Френеля, фронт ЕМХ сферичний (рис.2) і визначення пеленга за допомогою виразу (1) призводить до великих помилок.

У роботах [2,3] для цієї зони при визначенні пеленга запропоновано використовувати фазові зрушення щодо центральної антени і показано, що сферичність фронту ЕМХ дозволяє додатково визначати дальність до ДРВ.

Однак реалізація цих систем вимагає застосування точних і дорогих фазометрів, що стримує їх впровадження. Тому проаналізуємо можливість роботи алгоритму Кейпона для зони Френеля АР пеленгатора.

Для сферичного фронту ЕМХ набіги фаз між i -им та центральним елементом АР можна визначити як

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda}(d_i - d_0), \quad i = \overline{1, N} \quad (3)$$

де d_i – відстань від i -го елемента АР до ДРВ, яка згідно з рис.2, дорівнює

$$d_i = d_i(\beta, d_0) = \sqrt{\left(\frac{L(N-1)}{2}\right)^2 + d_0^2 - 2d_0\left(\frac{L(N-1)}{2}\right)\cos(90^\circ + \beta)}. \quad (4)$$

Управляючий вектор-стовбець АР можна подати у вигляді

$$\mathbf{S}_a(\beta_0, d_0) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-jkd_1(\beta, d_0)) \\ \vdots \\ \exp(-jkd_N(\beta, d_0)) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Як наслідок, модифікований алгоритм Кейпона передбачає обчислення функції вихідних сигналів лінійної АР, яка залежить як від кута приходу β , так і від дальності

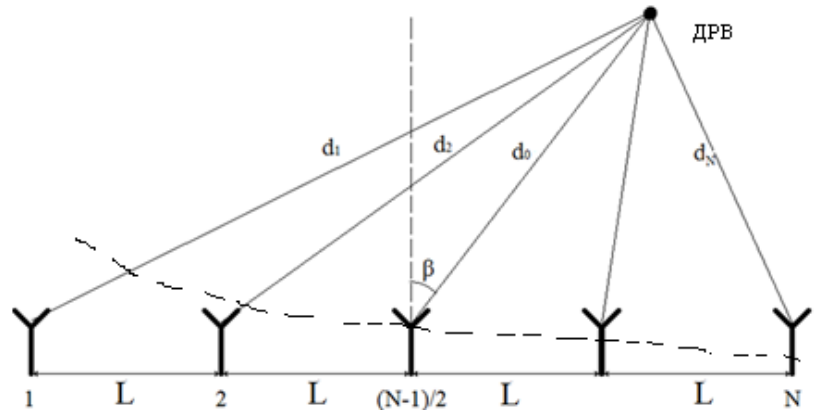


Рис. 2 Лінійна АР та сферичний фронт хвилі

$$V(\beta, d_0) = \frac{1}{F^2(\beta) \cdot \mathbf{S}_a^H(\beta, d_0) \cdot \mathbf{R}_{xx}^{-1}(\beta) \cdot \mathbf{S}_a(\beta, d_0)} \quad (6)$$

Отже, визначивши управляючий вектор для сферичного хвильового фронту, що дозволяє враховувати кривизну фронту ДРВ, при заданій геометричній конфігурації АР, алгоритм визначення кута і відстані до ДРВ, розташованих в ближній зоні (БЗ) і зоні Френеля АР пеленгатора можна представити такими кроками:

1) визначення кількості джерел в дальній зоні (ДЗ) по максимуму функції (1) вихідних сигналів $V_{ДЗ}(\beta)$;

2) обчислення функції $V(\beta, d)$ в декількох точках БЗ на фіксованих дальностях d_k : $d_1=R_{ДЗ}$, $d_2=0,75R_{ДЗ}$, $d_3=0,5R_{ДЗ}$, $d_4=0,25R_{ДЗ}$, $d_5=0,125R_{ДЗ}$ і т.д., де $R_{ДЗ}$ – границя ДЗ;

3) визначення з отриманої сукупності дальностей в БЗ (d_1, \dots, d_k) тієї пари суміжних значень (d_i, d_{i+1}), які описують діапазон дальностей $\Delta d = d_i - d_{i+1}$, при яких спостерігаються максимальні «сплески» функції $V(\beta, d)$ згідно (6), тобто конкретизація тієї частини зони, в яких знаходяться ДРВ;

4) розбиття діапазону Δd на піддіапазони з кроком δd ($\Delta d = N\delta d$) (див.рис.3) і обчислення функції $V(\beta, d)$ (рис.4) в точках $d_n = d_i + n\delta d$, $n = 1 \dots K$.

5) визначення за отриманою сукупністю ($V(\beta_1, d_1) \dots V(\beta_n, d_n)$) шуканої дальності d і пеленга β ДРВ за правилом $(d, \beta) = \text{argmax}(V(\beta_i, d_i))$, $i = 1 \dots K$, причому оцінка дальності буде тим точніша, чим менший крок δd .

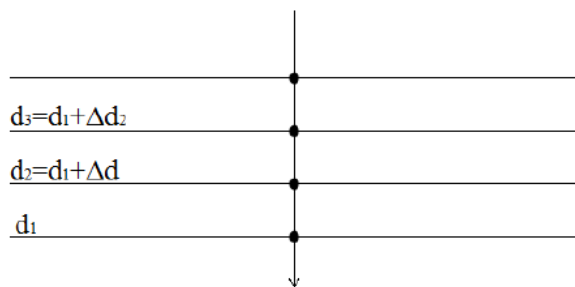


Рис. 3 Лінійна АР та відстань, на яку вона фокусується

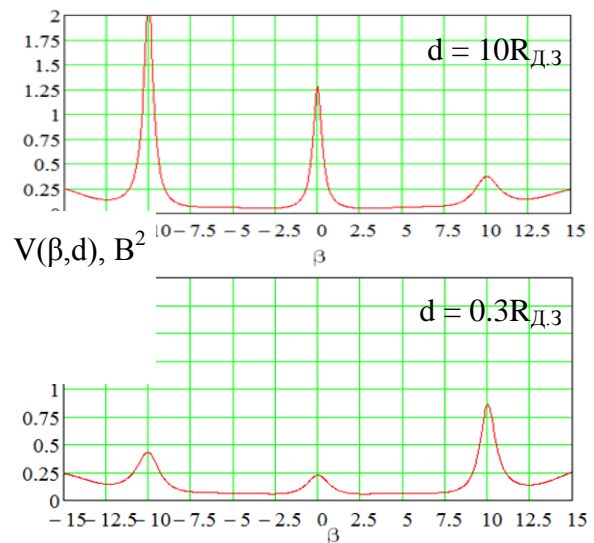


Рис. 4 Результати пеленгації по модифікованому алгоритму Кейпона

У доповіді також представлені деякі результати моделювання по даному алгоритму.

Література

1. J. Capon. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proc. IEEE, Vol. 57, No. 8, August 1969.

2. Авдеенко Г.Л., Федоров В.И., Якорнов Е.А. Определение местоположения источника радиоизлучения по кривизне фронта электромагнитной волны. Известия вузов. Радиотехника. - 2008. № 3. – с. 3-11.
3. Авдеенко Г.Л., Липчевская И.Л., Якорнов Е.А. Фазовые системы определения координат источника радиоизлучения гармонического сигнала в зоне Френеля. Известия ВУЗов. Радиотехника. 2012. № 2. – с. 24-33.