

РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБТ

УДК 621.391.812

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.3-6>

V. Atamaniuk, Yu. Kosovtsov, A. Zubkov, Yu. Shabatura, M. Mikhailieva

Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy

OBTAINING STABLE CHARACTERISTICS DESCRIPTION OF SIGNALS SCATTERED BY COMPLEX OBJECTS THROUGH FREQUENCY AVERAGING

An analysis of the appearance of a complex dependence of the echo signal field on the observation conditions was performed. It was demonstrated that it is caused by the interference of electromagnetic fields of the local scattering area (LSA) of a complex object with the spatial coherence of the probe signal generated by the antenna with a limited aperture. Reducing of the variability of the informative features is associated with solving the problem of reducing the interference of the local scattering area, forming the signal reflected by the target. This is possible either by increasing the spatial resolution of the radar system or by averaging the received field over a particular set of parameters. It was demonstrated that the carrier parameter of quasi-monochromatic premises for spectral scanning of the probe signal is an effective parameter for the formation of stable informative features of averaging signal. It follows from the analysis that, for a sufficiently wide band in which the scanning probe is scanned and the object is in an arbitrary spatial location, the phases of the scattered signal are statistically independent and uniformly distributed. It increases robustness of characteristics of scattered signals to the variations in observation parameters due to the decrease of the sensitivity of frequency-averaged parameters to the spatial position of LSA. The criterion of sufficiency of the frequency band for approximate fulfillment of abovementioned statistical independence is provided. It has been demonstrated that the characteristics of complex radio-locative objects obtained utilizing the signal frequency-averaging satisfy the conditions of universality of the description, robustness to the spatial position of LSA, accessibility of their observation, and informativeness.

Keywords: *frequency averaging, local scattering area, radio-locative characteristics of complex objects robust to the variation in observation conditions, signals scattered by complex objects, variability radio-locative characteristics.*

Introduction

The pertinent problem of radio-locative recognition of complex objects (targets) has been examined over decades.

One of the most important challenges preventing the problem to be solved is the detection of certain radio-locative features (standards) aiming to meet contradictory requirements.

On the one hand, those features should be informative enough in order to definitely characterize an object (or distinguish it as a representative of the certain class of objects). On the other hand, the number of standards should be minimized keeping in mind that they should be robust to the variations in radio-locative observations.

In order to study the processes of scattering of an electromagnetic wave by objects with a complex shaping surface, it is advisable to use the model of a limited set of local scattering regions for which the field at the entrance of the receiving path of the radar system can be represented in the form

$$E(t, \omega, \vec{\gamma}) = \sum_{i=1}^I A_i(\omega, \vec{\gamma}) e^{j\omega \frac{2R_i(\vec{\gamma})}{c}}, \quad (1)$$

where A_i - amplitude of the signal reflected by the i -th local scattering area (LSA) (local reflection area);

$\vec{\gamma}$ - a vector that characterizes the conditions of observation: the evolution of the state of the target, its orientation.

The complex dependence of the echo-signal field on the observation conditions is determined by the rapidly oscillating factor $\exp\{j\omega 2R_i/c\}$ and is due to the spatial coherence of the probing signal generated by the antenna with a limited aperture [1-3]. Therefore, if we do not take additional special measures, the field E , and all its parameters, are very sensitive to the change in conditions, which leads to a huge variety of signal characteristics at the input of the receiving path and makes it difficult to use them effectively for detection and recognition.

Therefore, the search of radio-locative characteristics of complex objects robust to the variation in observation

conditions, allowing to remove or at least to eliminate their extremely high variability in addition to that retaining its sufficient self-description, is an pertinent problem.

Problem statement

It is obvious that the decrease in the variability of informative features is connected with the solution of the problem of reducing the interference of the LSA forming the signal reflected by the target. In [4] it is shown that there are two rational ways of solving the above mentioned problem:

- increasing the spatial resolution of radar system. As for objects using antennas with small apertures, the principal role is played by increasing the resolving power in range. If the resolving power in the range is not worse than the average size of the characteristic constructive fragment of the shaping surface, then the output of the matched filter produces an impulse response or a distance "portrait" of the target, characterizing the distribution of LSA within the physical size of the target in range

$$g(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_i(\omega) e^{-j\omega \frac{2r}{c}} d\omega, \quad (2)$$

where r – is the current range within the physical target size. The variability of the distance "portrait" is determined by the dependence of the parameters of individual LSA on the conditions and, naturally, weaker than in the field (1);

– averaging of the received field by one or another set of parameters.

It should be noted that the averaging method proposed in [5] for a possible or conditional set of target positions, in which the average characteristics of the parameters of the scattered field $\rho(\vec{v}) = \rho[E(\vec{v})]$ are determined by the expression

$$\bar{\rho} = \int \rho(\vec{v}) w(\vec{v}) d\vec{v}, \quad (3)$$

where $w(\vec{v})$ - is the joint density of the distribution of the values characterizing the position of the target, for example, the probing angles in the vertical and horizontal planes, in practical radar can hardly be applied.

Firstly, the calculation of the average characteristics of the field parameters in accordance with expression (3) is possible only with a known dependence $\rho = \rho(\vec{v})$, which, generally speaking, presupposes specifying an analytical representation of the received signal. Secondly, there is a completely natural arbitrariness in the choice of the distribution density $w(\vec{v})$. In additional point is that, this approach is associated with rather cumbersome calculations, which allows one to obtain results only within the framework of the correlation theory.

Result and discussion

An effective parameter for the formation of stable informative features of recognition by averaging is the carrier frequency of quasi-monochromatic premises in the spectral scanning of the radar signal [4, 6]. The field of the signal reflected by the complex target can be written in the spectral region

$$E(\bar{\omega}) = \sum_{i=1}^I A_i e^{j \frac{2R_i}{c} \omega} = \sum_{i=1}^I A_i e^{j\phi_i}, \quad (4)$$

where $\phi_i = \left| \frac{2R_i}{c} \omega \right|_{2\pi}$, – are the phases of the elementary components of the signal, reduced to the periodicity interval of the complex exponential (see Fig. 1).

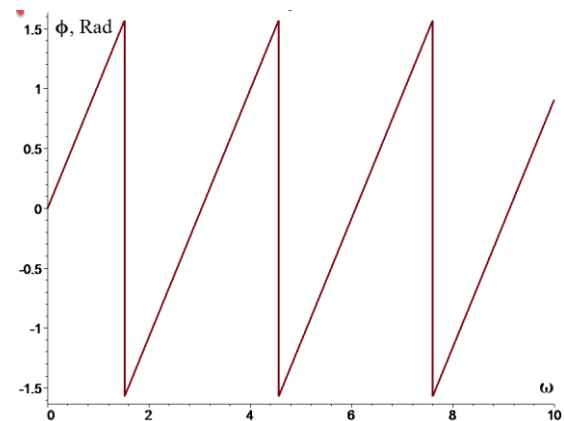
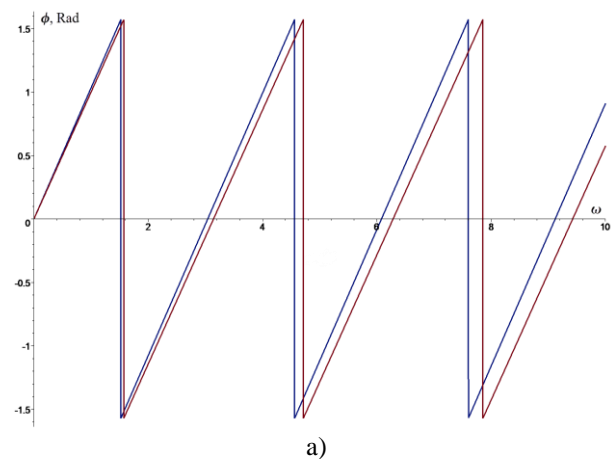


Fig. 1. Dependence reduced to the interval $(0 \div 2\pi)$ of the phase of scattered signal one LSA from the frequency

The pitch of the saw and, accordingly, the frequency of the saw ϕ_i , is determined by the values of R_i . The amplitudes of LSA A_i are assumed to be constant in a sufficiently wide frequency band, which is usually performed in short-wave part of radio range. If in the sum (4) R_i are incommensurable, then depending on the frequency ϕ_i these dependencies will vary inconsistently (see Fig. 2).



a)

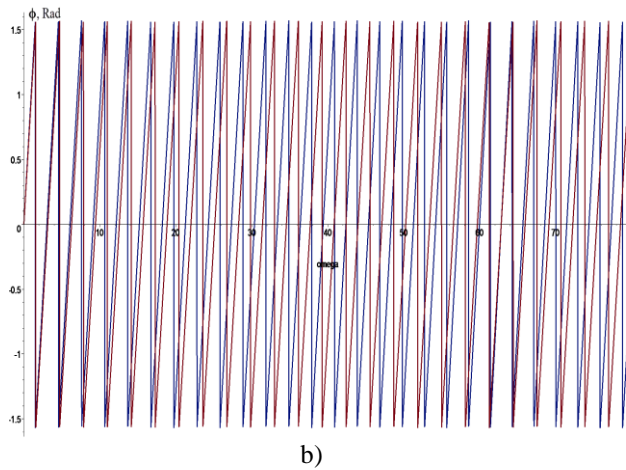


Fig. 2. Dependence reduced to the interval $(0 \div 2\pi)$ of the phase of scattered signal from the frequency an object consisting of two LSA (a) range of relative change frequency 10, (b) range of relative change frequency 80)

With a sufficiently broad band in which spectral scanning of the probe signal is carried out, the phases ϕ_i turn out to be statistically independent and uniformly distributed, i.e. if i runs through a finite set of values 1, ... I and R_i are incommensurate ($\sum_{i=1}^I m_i R_i \neq 0$ for any integer m_i , not equal to zero at the same time), then in the frequency band $\omega_0 \leq \omega < \infty$ ϕ_i are "statistically independent" and the multidimensional probability density [4] is

$$W(\phi_1, \dots, \phi_I) = \frac{1}{(2\pi)^I}. \quad (5)$$

Indeed, due to the periodicity of the complex exponential function $e^{j\phi(\omega)} = e^{j\frac{2R_i}{c}\omega}$, the multidimensional characteristic function (CF) of the random process (4) can be written in the form

$$\begin{aligned} \Theta_\phi(v_1, \dots, v_I) &= \\ &= \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Omega} \exp \left\{ j \operatorname{Re} \sum_{i=1}^I A_i v_i^* e^{j\frac{2R_i}{c}\omega} \right\} d\omega = \\ &= \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Omega} \exp \left\{ j \sum_{i=1}^I A_i |v_i| \cos \left[\frac{2R_i}{c} \omega \right] \right\} d\omega, \end{aligned} \quad (6)$$

where v_i^* - are complex variables of the CF, $|v_i|$ accordingly their modules and arguments.

Using the representation

$$e^{jB \cos \phi} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m I_m(B) e^{jm\phi},$$

(7) can be written

$$\begin{aligned} \Theta_\phi(v_1, \dots, v_I) &= \\ &= \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Omega} \prod \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m I_m(A_i |v_i|) e^{jm \left[\frac{2R_i}{c} \omega \right]} \right\} d\omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Here I_m - is the Bessel's function. If we multiply infinite sums, then the problem reduces to calculating integrals of the form

$$\begin{aligned} &(j)^{m_1 + \dots + m_I} I_{m_1}(A_1 |v_1|) \dots I_{m_I}(A_I |v_I|) \times \\ &\lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Omega} \exp \left\{ j \frac{2\omega}{c} \sum_{i=1}^I (m_i R_i) \right\} d\omega. \end{aligned} \quad (8)$$

The integral in the expression (8) converges if $\sum_{i=1}^I m_i R_i \neq 0$ [7]. Taking into account the above mentioned condition on the incommensurability of R_i , we obtain that different from zero by $\Omega \rightarrow \infty$ for the expansion of CF will be a member $m_i R_i \equiv 0$ for any i so the expression (7) transforms to

$$\Theta_\phi(v_1, \dots, v_I) = \prod I_0(|v_i|). \quad (9)$$

Thus, a multidimensional CF can be represented as a product of one-dimensional CF processes with a uniform distribution of ϕ_i on the interval $[0, 2\pi]$, which means the statistical independence of ϕ_i . The information about amplitude LSA saves.

An approximate equality to zero for the terms of the decomposition of CF is ensured by the condition

$$\frac{\Omega}{c} \left| \sum_{i=1}^I m_i R_i \right| \gg 1 \quad (10)$$

for any integer m, not equal to zero at the same time.

Conclusions

It follows from the analysis that when averaging the characteristics of the echo signal in a wide frequency band Ω , it is possible to use (5) as an averaging function for a sufficiently arbitrary spatial position of the target's LSA.

It should be noted that the description of the characteristics of the radar signal by averaging over the spectral scanning range of the probing signal satisfies the conditions formulated above, namely, it is:

- sufficiently universal;
- stable, because of the insensitivity of the distribution (5) to the spatial position of the LSA;
- observable, as the formation of characteristics is made by changing the parameters of the sounding signal and does not impose significant restrictions on the external operating conditions of radar system;
- informative since it mainly affects the phase characteristics of LSA, keeping the information stock in the form of distribution of their amplitudes.

References

1. P.Tait, *Introduction to Radar Target Recognition*. Published by The Institution of Engineering of Technology, IET Radar, Sonar and Navigation Series 18, London, United Kingdom, 2005.
2. O. I. Sukharevsky, *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2015.
3. N. Youssef, "Radar cross section of complex targets," *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, pp. 722-734, May 1989.

4. S. Luo and S. Li, "Automatic target recognition of radar HRRP based on high order central moments features," *Journal of electronics (China)*, vol. 26, No.2, pp. 184–190, March 2009.

5. D. E. Nelson, J. A. Starzyk, D. D. Ensley, "Iterated Wavelet Transformation and Signal Discrimination for HRR Radar Target Recognition," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol.33, No.1, pp. 52–57, January 2002.

6. S. Guangmin, W. Jing, Q. Shengfeng, N. Jingfang, "Radar target recognition based on the multi-resolution analysis theory and neural network," *Pattern Recognition Letters* 29 (2008), pp. 2109–2115.

7. D. Lan, L. Hongwei, B. Zheng, "Radar HRRP statistical recognition based on hypersphere model," *Signal Processing* 88 (2008), pp.1176 – 1190.

Частотне усереднення як спосіб отримання стійкого опису характеристик сигналів, розсіяних складними об'єктами

В.В. Атаманюк, Ю.М. Косовцов, А.М. Зубков, Ю.В. Шабатура, М.С. Міхалєва

У роботі розглянута радіолокаційна модель складного об'єкта у вигляді сукупності ділянок локального розсіювання (ДЛР), кожна з яких характеризується амплітудою і фазою. Проведений аналіз виникнення складної залежності розсіяного складним об'єктом поля від умов спостереження, що призводить до величезної мінливості характеристик сигналів на вході приймального тракту і утруднює їх ефективне використання для виявлення та розпізнавання. Показано, що ця мінливість обумовлена інтерференцією електромагнітних полів, розсіяних ДЛР складного об'єкта при просторовій когерентності зондуючого сигналу, який формується антеною з обмеженою апертурою. Зниження варіативності інформативних ознак пов'язано з розв'язанням проблеми зменшення взаємодіючої ДЛР, які формують відбитий ціллю сигнал. Способами можливого зменшення такого взаємодіючого впливу може бути або підвищення просторових роздільних здатностей радіолокаційної системи, або усереднення поля, яке приймається по тому чи іншому набору параметрів. Відомий метод усереднення по можливій сукупності положень цілі, наприклад, кутів спостереження в вертикальній і горизонтальній площинах, в практичній радіолокації навряд чи може бути застосований. У роботі показано, що ефективним параметром для формування стійких інформативних ознак цілей шляхом усереднення є носійна частота квазімонохроматичних посилко зондуючого сигналу. З проведеного аналізу випливає, що при достатньо широкій смузі, в якій здійснюється спектральне сканування зондуючого сигналу і при достатньо доволіному просторовому розміщенні ДЛР об'єкта, фази розсіяного сигналу виявляються як би статистично незалежними і рівномірно розподіленими. Такий алгоритм підвищує стійкість характеристик розсіяного сигналу до зміни параметрів спостереження в силу зменшення чутливості усереднених по частоті параметрів до просторового положення ДЛР. Наведений критерій достатності смуги частот для приблизного виконання вищевказаної статистичної незалежності. Показано, що характеристики складних радіолокаційних об'єктів, отримані з допомогою частотного усереднення сигналу задовольняють умовам універсальності опису, стійкості до просторового положення ДЛР, доступності їх спостереження та інформативності.

Ключові слова: частотне усереднення, ділянка локального розсіювання, стійкі до зміни радіолокаційні характеристики складних об'єктів, розсіяний складним об'єктом сигнал.

Частотное усреднение как способ получения устойчивого описания характеристик сигналов, рассеянных сложными объектами

В.В. Атаманюк, Ю.Н. Косовцов, А.Н. Зубков, Ю.В. Шабатура, М.С. Михалева

В работе рассмотрена радиолокационная модель сложного объекта в виде совокупности участков локального рассеяния (УЛР), каждый из которых характеризуется амплитудой и фазой. Проведен анализ возникновения сложной зависимости поля эхо-сигнала от условий наблюдения, что приводит к огромной изменчивости характеристик сигналов на входе приёмного тракта и затрудняет их эффективное использование для обнаружения и распознавания. Показано, что эта изменчивость обусловлена интерференцией электромагнитных полей, рассеянных УЛР сложного объекта при пространственной когерентности зондирующего сигнала, формируемого антенной с ограниченной апертурой. Снижение вариативности информативных признаков связано с решением проблемы уменьшения взаимовлияния УЛР, формирующих отраженный целью сигнал. Способами возможного уменьшения такого взаимовлияния может быть либо повышение пространственных разрешающих способностей радиолокационной системы, либо усреднение принимаемого поля по тому или иному набору параметров. Известный метод усреднения по возможной совокупности положений цели, например, углов наблюдения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, в практической радиолокации вряд ли может быть использован. В работе показано, что эффективным параметром для формирования устойчивых информативных признаков целей путем усреднения является несущая частота квазімонохроматических посылок зондирующего сигнала. Из проведенного анализа следует, что при достаточно широкой полосе, в которой осуществляется спектральное сканирование зондирующего сигнала и при достаточно произвольном пространственном расположении УЛР объекта, фазы рассеянного сигнала оказываются как бы статистически независимыми и равномерно распределенными. Это повышает устойчивость характеристик рассеянного сигнала к изменению параметров наблюдения в силу уменьшения чувствительности усредненных по частоте параметров к пространственному положению УЛР. Приведен критерий достаточности полосы частот для приблизительного выполнения вышеуказанной статистической независимости. Показано, что характеристики сложных радиолокационных объектов, полученные с помощью частотного усреднения сигнала удовлетворяют условиям универсальности описания, устойчивости к пространственному положению УЛР, наблюдаемости и информативности.

Ключевые слова: частотное усреднение, участок локального рассеяния, устойчивые к изменению радиолокационные характеристики сложных объектов, рассеянный сложным объектом сигнал.