

В. К. ВОЛОСЮК, С. С. ЖИЛА, Г. С. ЧЕРЕПНИН, Э. А. ЦЕРНЭ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ МЕТОДАМИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Рассмотрена обобщённая структура электромагнитного поля в области его регистрации в случае решения задачи дистанционного зондирования подстилающей поверхности. Приводятся примеры существующих радиолокационных и оптических когерентных устройств. Получены аналитические выражения электромагнитного поля в ближней зоне Френеля, когда размеры приёмной области и области излучения значительно меньше расстояния между ними. Показаны основные операции, необходимые для восстановления когерентных изображений в ближней зоне Френеля методами многоканальной обработки сигналов. В качестве амплитудно-фазового распределения приёмной чувствительности области регистрации целесообразно выбрать классическую базисную функцию преобразования Френеля с обратным знаком в степени экспоненты. Формально, в бесконечных пределах, преобразование Френеля обратимо, т.е. в идеальном случае искомое когерентное изображение может быть полностью восстановлено. Однако физически зоне Френеля удовлетворяет область с конечными размерами. Из анализ полученных операций обработки принятого поля следует, что радиолокационная или оптическая система формирует оценку когерентного изображения в виде свёртки истинного изображения подстилающей поверхности с функцией неопределённости. Обычно эта функция содержит два множителя, один из которых определяет пространственную разрешающую способность восстановленного когерентного изображения, а второй показывает возможность его вторичной обработки. В частном случае, когда линейные размеры поля регистрации уходят в бесконечность, функция неопределённости принимает форму дельта-функции, и требуемое изображение может быть восстановлено без искажений. Для прямоугольной области конечных размеров функция неопределённости имеет вид двух функций sinc, ширина которых прямо пропорциональна длине волны, высоте зондирования и обратно пропорциональна линейным размерам области приёма в соответствующих координатах. Разрешающую способность восстановленного изображения в этом случае предлагается определять по первым нулям.

Ключевые слова: когерентное изображение, ближняя зона Френеля, функция неопределённости, многоканальная обработка

Введение

Значительная часть современных радиотехнических [1-3] и оптических [4-6] систем дистанционных исследований разрабатываются для построения изображений наблюдаемых поверхностей или объектов. Это связано с информативностью изображений, из анализа которых возможно оценить структуру объекта, его геометрическую форму, размер и другие параметры. Обычно под изображением понимают фотографии, представляющие собой результат регистрации интенсивностей электромагнитных волн. В тоже время существуют более информативные изображения – когерентные изображения, формируемые когерентными радиолокаторами [7] или с использованием когерентных источников света – лазеров [8]. Системы построения та-

ких изображений обычно проектируется в предположении, что область регистрации поля находится на значительном расстоянии от исследуемой области, в дальней зоне Фраунгофера. Это позволяет упростить обработку и учитывать при фокусировке только линейный набег фаз. В тоже время существуют задачи, в которых необходимо проводить исследования на малых расстояниях, в ближней зоне Френеля. В таком случае **целью работы** является обоснования возможности восстановления радиолокационных изображений в ближней зоне Френеля. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать поле в области его регистрации;
- разработать основные операции обработки принятых сигналов;
- оценить качество восстановленных изображений.

Структура электромагнитного поля в области его регистрации

На рис. 1 показана одна из распространённых геометрий расположения областей определения когерентного изображения как функции пространственных координат и наблюдаемого поля, создаваемого этим изображением. Такая геометрия подходит для восстановления оптических и радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования различных поверхностей.

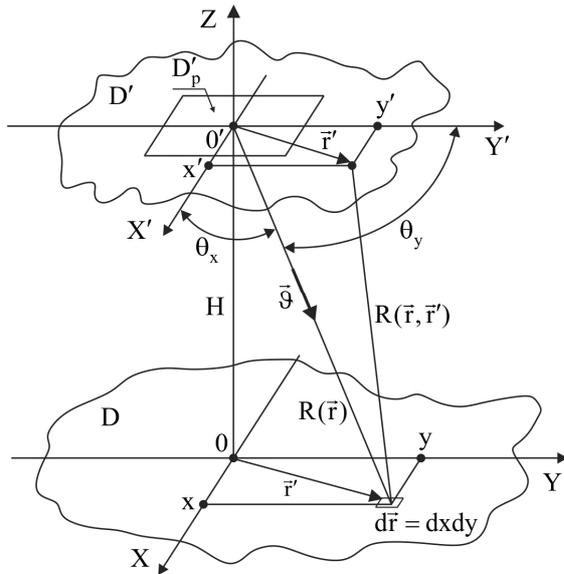


Рис. 1. Геометрия задачи дистанционного зондирования различных поверхностей

На этом рисунке поверхность D – это поверхность, на которой задано распределение комплексного коэффициента рассеяния $\hat{F}(\vec{r})$, D' – это область наблюдения и первичного (до обработки) описания в когерентном виде поля с учётом его амплитудных и фазовых зависимостей. Коэффициент $\hat{F}(\vec{r})$ показывает способность каждого элемента поверхности D изменять амплитуду и фазу падающего поля. Именно $\hat{F}(\vec{r})$ будем считать искомым идеальным когерентным изображением.

С учётом времени t поле как пространственно-временной процесс можно в области наблюдения представить таким выражением [1]

$$\dot{\epsilon}(t, \vec{r}') = \int_D \hat{F}(\vec{r}) \frac{\exp\{j\omega[t - t_R(\vec{r}, \vec{r}')] \}}{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r} = \dot{E}(\vec{r}') e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где $t_R(\vec{r}, \vec{r}') = R(\vec{r}, \vec{r}')/c$ – время запаздывания поля при его распространении от точки \vec{r} до точки \vec{r}' , $R(\vec{r}, \vec{r}')$ – расстояние между этими точками, c – скорость распространения волн,

$$\dot{E}(\vec{r}') = \int_D \hat{F}(\vec{r}) \frac{\exp[-jkR(\vec{r}, \vec{r}')] }{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r} \quad (2)$$

– комплексная амплитуда поля в области наблюдения $\vec{r}' \in D'$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, ω – круговая частота, λ – длина волны.

В области наблюдения D' также находится область регистрации поля D'_p , рис. 1, размеры которой определяются размерами приёмных поверхностей регистрирующих устройств рассеянных сигналов. В дальнейшем область наблюдения и область регистрации будем считать тождественными, указывая только их размеры, соответствующие размерам приёмных поверхностей регистрирующих устройств. Областью регистрации D'_p в радиодиапазоне может быть апертура (раскрыв) антенны или антенной решётки, а в оптике – область пространства, непосредственно прилегающая к поверхности светочувствительного регистрирующего элемента (транспаранта, фотоплёнки).

Рассмотрим основные операции восстановления когерентного изображения поверхности из принятого поля $\dot{E}(\vec{r}')$ в области регистрации D'_p .

Описание процедуры восстановления когерентного изображения в зоне Френеля

Физический процесс формирования оценки $\hat{F}(\vec{r})$ когерентного изображения $\hat{F}(\vec{r})$ заключается в фокусировке оптической или антенной системы на каждую точку поверхности $\vec{r}_i \in D$. Математически эта операция выполняется путём интегрирования комплексной амплитуды принятого поля (2) с весом $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_i)$, обеспечивающим синфазное сложение колебаний, зарегистрированных в каждой точке области D'_p

$$\hat{F}(\vec{r}_i) = \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_i) \int_D \hat{F}(\vec{r}) \frac{\exp[-jkR(\vec{r}, \vec{r}')] }{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r} d\vec{r}'. \quad (3)$$

В выражении (3) вес $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_i)$ – амплитудно-фазовое распределение (АФР) приёмной чувствительности области D'_p , описывающее возможность каждой точки этой области преобразовывать амплитуду и фазу принятого поля.

В бесконечных пределах интегрирования внутренний интеграл в (3) представляет собой некое математическое преобразование коэффициента $\hat{F}(\vec{r})$, в

котором функция Грина, описывающая математически сферическую волну, является базисной. Тогда при обращении этого преобразования логичным является применение комплексно-сопряжённой базисной функции Грина.

Функция $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1)$ в (3) во многих случаях определяется как характеристика непосредственно самого когерентного регистрирующего устройства, а поле вблизи его поверхности описывается выражением (2). В радиодиапазоне $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1)$ – это АФР приёмной антенной системы, которая создаётся либо с помощью антенных диаграммо-образующих схем, либо в компьютере после соответствующей оцифровки выходных сигналов антенн, входящих в состав антенной решётки. В оптике такая функция может быть реализована с помощью транспарантов и линз. Функцию $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1)$ в ряде случаев можно будет называть опорной, опорным пространственно-временным сигналом или опорным полем. В радиолокации при решении задач оптимальной корреляционной обработки принимаемых сигналов подобную роль выполняет представленный в комплексно-сопряжённой форме образец зондирующего сигнала, также называемый часто опорным.

В качестве примеров рассмотрим конкретные выражения формулы (2) для ближней зоны Френеля, когда размеры одной из областей D, D' значительно меньше высоты H . В этом случае расстояние $R(\vec{r}, \vec{r}')$ в показателе экспоненты (2) можно приближённо представить таким выражением

$$R(x, x', y, y') = H + [x - x']^2 / 2H + [y - y']^2 / 2H. \quad (4)$$

Полагая, что в ближней зоне Френеля основной вклад в ослабление поля вносит высота H , перепишем (2) с учётом (4)

$$\dot{E}(\vec{r}') \approx \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \dot{F}_1(x, y) e^{-j \frac{k}{2H} ([x-x']^2 + [y-y']^2)} dx dy, \quad (5)$$

где $\dot{F}_1(x, y) = \dot{F}(x, y) H^{-1} \exp(-jkH)$, X, Y – линейные размеры области наблюдения. Двойной интеграл в (5) – это преобразование Френеля функции $\dot{F}_1(x, y)$.

Формально в бесконечных пределах это преобразование обратимо, т.е. в идеальном случае функция $\dot{F}_1(x, y)$ полностью восстанавливается. Однако физически зону Френеля даже для конечных областей D и D' больших размеров обеспечить невозможно. Приближенное обращение можно осуществить на конечной области D' , если в качестве

АФР выбрать с обратным знаком в показателе экспоненты в обратном преобразовании Френеля классическую базисную функцию

$$\dot{I}(x', y', x_1, y_1) = e^{j \frac{k}{2H} ([x_1-x']^2 + [y_1-y']^2)}. \quad (6)$$

При подстановке (6) в (3) получим следующее выражение для оценки когерентного изображения:

$$\begin{aligned} \hat{F}_1(\vec{r}_1) &= \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} e^{j \frac{k}{2H} ([x_1-x']^2 + [y_1-y']^2)} \times \\ &\times \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \dot{F}_1(x, y) e^{-j \frac{k}{2H} ([x-x']^2 + [y-y']^2)} dx dy dx' dy' = \\ &= \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \dot{F}_1(x, y) \dot{\Psi}(x, x_1, y, y_1) dx dy, \quad (7) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(x, x_1, y, y_1) &= \\ &= \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} e^{-j \frac{k}{2H} ([x-x']^2 - [x_1-x']^2 + [y-y']^2 - [y_1-y']^2)} dx' dy' \quad (8) \end{aligned}$$

– функция неопределённости системы формирования оценки $\hat{F}_1(\vec{r}_1)$, X', Y' – линейные размеры области регистрации.

Оценка качества восстановленного когерентного изображения в зоне Френеля

Из анализа выражения (7) следует, что радиолокационная или оптическая система формирует оценку когерентное изображения $\hat{F}_1(x, y)$ в виде свёртки истинного изображения $\dot{F}_1(x, y)$ с функцией $\dot{\Psi}(\cdot)$. Эта функция определяет качество формирования когерентного изображения. Вычислим двойной интеграл в (8) и перепишем $\dot{\Psi}(\cdot)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(x, x_1, y, y_1) &= \dot{\phi}(x, x_1, y, y_1) \Psi(x, x_1, y, y_1) = \\ &= e^{-j \frac{k}{2H} (x^2 - x_1^2 + y^2 - y_1^2)} \times \\ &\times X' Y' \text{sinc}(k(x_1 - x) X' / 2H) \text{sinc}(k(y_1 - y) Y' / 2H). \quad (9) \end{aligned}$$

Из (9) следует, что для АФР вида (6) функция $\dot{\Psi}(\cdot)$ содержит два множителя, при этом разрешаю-

щую способность восстановления когерентного изображения $\hat{f}_1(x, y)$ главным образом определяет аппаратная функция $\Psi(x, x_1, y, y_1)$. Вид этой функции показан на рис. 2.

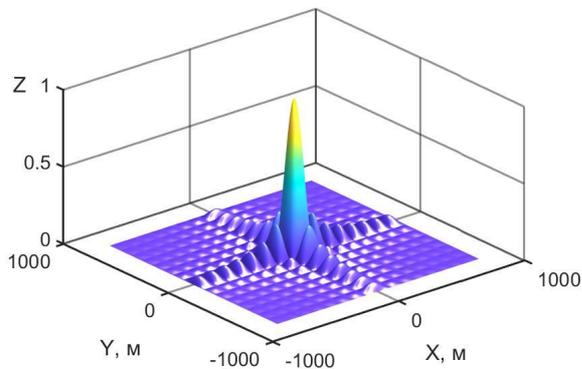


Рис. 2. Функция ($\Psi(x, x_1, y, y_1)$) при АФР вида (6)

Если разрешающую способность формируемого когерентного изображения определять шириной Δx и Δy функции $\Psi(x, x_1, y, y_1)$ на нулевом уровне, тогда

$$\Delta x = \lambda N / X', \quad \Delta y = \lambda N / Y'. \quad (10)$$

Полученная разрешающая способность (10) при выбранной длине волны и высоты зондирования определяется размером области регистрации D' . При этом создание на практике больших антенн (к примеру, бортовых) сопряжено с трудностями их техническими реализации. В таком случае получить более качественную оценку когерентного изображения с большим разрешением возможно за счёт сканирования и перемещения в пространстве приёмной плоскости. Такие изображения будем называть синтезированными когерентными изображениями.

Заключение

Рассмотрена структура принятого электромагнитного поля с учётом его задержки и затухания при распространении. Для ближней зоны Френеля конкретизированы расстояния от каждой точки поверхности до области регистрации. Показаны общие выражения для восстановления когерентного изображения и конкретизировано АФР для случая восстановления в ближней зоне Френеля. Приведены выражения для определения разрешающей способности формируемых изображений, зависящие от длины волны, расстояния между облучаемой и принимаемой плоскостями и линейных размеров области регистрации.

Дальнейшие исследования будут посвящены анализу фазового множителя функции неопределённости $\hat{\phi}(x, x_1, y, y_1)$, наличие которого даёт возможность выполнять вторичную обработку изображений и восстанавливать синтезированные когерентные изображения поверхности с более высокой пространственной разрешающей способностью.

Литература

1. Волосюк, В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко ; под общ. ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 740 с.
2. Volosyuk, V. K. Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar [Text] / V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) : Materials of the conf., May 29 – June 2 2017. – Kiev, 2017. – P. 189-193.
3. Sandora, J. S. An ultra-wideband Vivaldi and linear hybrid taper antenna for use in a near-field real-time phased array radar system [Text] / J. S. Sandora, G. L. Charvat // 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology : Materials of the intern. symp., 15-18 October 2013. – Waltham, MA, 2013. – P. 307-313.
4. Improved method of Optical Coherence Tomography imaging [Text] / P. Hunziker, O. V. Morozov, O. V. Volosyuk, V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla // 2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET) : Materials of the intern. conf., 5-7 July 2016. – Lviv, 2016. – P. 421-424.
5. Interferometric synthetic aperture microscopy (ISAM). In Optical Coherence Tomography [Text] / S. G. Adie, N. D. Shemonski, T. S. Ralston, P. S. Carney, S. A. Boppart // Jour. Technology and Applications. – 2015. – № 2. – P. 965-100.
6. De Cai. Scanning mirror-based photoacoustic microscopy with synthetic aperture focusing technique [Text] / De Cai, Zhongfei Li, S. L. Chen // 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) : Materials of the. conf., 28 June – 2 July 2015. – Shanghai, 2015. – P. 1-3.
7. Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar [Text] / V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, M. O. Antonov, O. A. Khaleev // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) : Materials of the intern. conf., 18-20 April 2017. – Kiev, 2017. – P. 511-516.
8. Optical Coherence Tomography imaging with a planar broadband light beam [Text] / P. Hunziker, O. V. Morozov, O. V. Volosyuk, V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla // 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) : Materials of the intern. symp., 20-24 June 2016. – Kharkiv, 2016. – P. 1-4.

References

1. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii* [Statistical theory of radio engineering systems of remote sensing and radar]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 740 p.
2. Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S. Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 29 May – 2 June 2017, Kiev, 2017, pp. 189-193.
3. Sandora, J. S., Charvat, G. L. An ultrawide-band Vivaldi and linear hybrid taper antenna for use in a near-field real-time phased array radar system. *2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 15-18 October 2013, Waltham, MA, 2013, pp. 307-313.
4. Hunziker, P., Morozov, O. V., Volosyuk, O. V., Volosyuk V. K., Zhyla S. S. Improved method of Optical Coherence Tomography imaging. *2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 5-7 July 2016, Lviv, 2016, pp. 421-424.
5. Adie, S. G., Shemonski, N. D., Ralston, T. S., Carney, P. S., Boppart, S. A. Interferometric synthetic aperture microscopy (ISAM). In *Optical Coherence Tomography. Technology and Applications*, 2015, Second edition, pp. 965-1004.
6. De Cai, Zhongfei Li, Chen, S. L. Scanning mirror-based photoacoustic microscopy with synthetic aperture focusing technique. *2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, 28 June – 2 July 2015, Shanghai, 2015, pp. 1-3.
7. Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S., Antonov, M. O., Khaleev, O. A. Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in syntetic aperture radar. *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 18-20 April 2017, Kiev, 2017, pp. 511-516.
8. Hunziker, P., Morozov, O. V., Volosyuk, O. V., Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S. Optical Coherence Tomography imaging with a planar broadband light beam. *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 20-24 June 2016, Kharkiv, 2016, pp. 1-4.

Поступила в редакцію 27.06.2018, рассмотрена на редколлегии 12.09.2018

ВІДНОВЛЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПОВЕРХОНЬ В ЗОНІ ФРЕНЕЛЯ МЕТОДАМИ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

В. К. Волосюк, С. С. Жила, Г. С. Черепнін, Е. О. Церне

Розглянута узагальнена структура електромагнітного поля в області його реєстрації у випадку вирішення задачі дистанційного зондування підстильної поверхні. Наводяться приклади існуючих радіолокаційних і оптичних когерентних пристроїв. Отримано аналітичні вирази електромагнітного поля в ближній зоні Френеля, коли розміри області прийому і області випромінювання значно менші ніж відстань між ними. Показані основні алгоритмічні операції, що необхідні для відновлення когерентних зображень в ближній зоні Френеля методами багатоканальної обробки сигналів в радіоелектронних і оптичних системах. В якості амплітудно-фазового розподілу прийомної чутливості області реєстрації доцільно вибрати класичну базову функцію перетворення Френеля з протилежним знаком в ступені експоненти. Формально, в нескінченних межах області реєстрації, перетворення Френеля може бути оберненим, тобто в ідеальному випадку шукане когерентне зображення підстильної поверхні може бути повністю відновлене. Однак фізично зоні Френеля задовольняє область з кінцевими розмірами. З аналізу отриманих операцій обробки прийнятого поля випливає, що радіолокаційна або оптична система формує оцінку когерентного зображення у вигляді згортки істинного зображення підстильної поверхні з функцією невизначеності системи. Зазвичай ця функція містить два множника, один з яких визначає просторову роздільну здатність відновленого когерентного зображення, а другий показує можливість його вторинної обробки. В окремому випадку, коли лінійні розміри поля реєстрації наближаються до нескінченності, функція невизначеності приймає форму дельта-функції, і когерентне зображення поверхні може бути відновлено без спотворень. Для прямокутної області кінцевих розмірів функція невизначеності має вигляд двох функцій sinc, ширина яких прямо пропорційна довжині хвилі, висоті зондування і обернено пропорційна лінійним розмірам області прийому у відповідних координатах. Роздільну здатність відновленого зображення в цьому випадку пропонується визначати за першими нулями функції невизначеності.

Ключові слова: когерентне зображення, ближня зона Френеля, функція невизначеності, багатоканальна обробка.

**RECOVERY OF SURFACES COHERENT IMAGES IN THE FRESNEL REGION
BY THE METHODS OF MULTICHANNEL SIGNAL PROCESSING**

V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, H. S. Cherepnin, E. A. Tserne

The generalized structure of the electromagnetic field in the registration area is considered in the case of the solution of problems of remote sensing of the underlying surfaces. Examples of the existing radar and optical coherent devices are given. Analytical expressions for the electromagnetic field in the reception area when sounding is carried out in a near-field Fresnel region, in the assumption that the size of the field of registration and radiation is considerably less than a distance between them, are concretized. It is shown the main operations that are necessary for the recovery of coherent images in a near-field Fresnel region by the methods of multichannel signal processing. Research shows that as the amplitude-phase distribution of the registration field is necessary to choose the classical basic function of Fresnel transformation with the reversed sign in the exponent power. Formally, in an infinite range, the Fresnel transform is invertible, i.e. in the ideal case, the function can be completely restored. However physically to Fresnel's region satisfies area with finite sizes. From the analysis of the obtained operations over the received field, it follows that the radar or optical system forms an estimate of the coherent image in the form of a convolution of a true image of the underlying surface with an ambiguity function. Generally, this function contains two multipliers, one of which determines the resolution of recovery of the coherent image. In that specific case, when the linear sizes of the field of registration go to infinity, ambiguity function takes a form of delta function and the required image can be restored without distortions. It is offered to determine resolution by the width between first zeros of ambiguity function. For rectangular area ambiguity function has the form of two sinc functions which width is directly proportional to wavelength, to the height of sounding and is inversely proportional to the linear sizes of receiving area on the corresponding coordinates. Finally, it is mentioned that for the higher-quality coherent imaging with good resolution by the same receiving area it is necessary to perform scanning and movement in space.

Keywords: coherent image, near-field Fresnel region, ambiguity function, multichannel processing.

Волосюк Валерий Константинович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры аэрокосмических радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: valeriy_volosyuk@mail.ru.

Жила Семён Сергеевич – канд. техн. наук, докторант кафедры аэрокосмических радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: simeon.zhyla@gmail.com.

Черепнин Глеб Сергеевич – студент кафедры аэрокосмических радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: derfanski7@gmail.com.

Цернэ Эдуард Алексеевич – студент кафедры аэрокосмических радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tserne.eduard@gmail.com.

Volosyuk Valerii – Doctor of Technical Science, professor, professor at the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: valeriy_volosyuk@mail.ru.

Zhyla Simeon – PhD, doctoral candidate at the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: simeon.zhyla@gmail.com.

Cherepnin Hleb – student at the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: derfanski7@gmail.com.

Tserne Eduard – student at the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: tserne.eduard@gmail.com.