

УДК 621.396.96+537.874.4

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПУТНИКОВ GPS

А.В. Ксендзук, канд. техн. наук

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрена многопозиционная система дистанционного зондирования с синтезированием апертуры антенны, основанная на использовании навигационных спутников системы GPS в качестве передающих элементов. Для такой системы получены аналитические выражения для функций неопределенности и приведены результаты моделирования с использованием реальных данных о местоположении и характере движения в пространстве спутников GPS.

* * *

Розглянуто багатопозиційну систему дистанційного зондування зі синтезуванням апертури антени, основу на використанні навігаційних супутників системи GPS як передавальних елементів. Для такої системи отримано аналітичні вирази для функцій невизначеності й наведено результати моделювання з використанням реальних даних про місцеположення та характер руху у просторі супутників GPS.

* * *

This paper represents study of the multiposition remote sensing system with synthesized aperture. This system is based on the usage GPS navigation satellites as a transmitters. For this system derived analytic equations for SAF as well as presented modeling results. During modeling was used real data about GPS satellites position, velocity and acceleration.

Спутниковая навигационная система GPS получила широкое распространение благодаря высоким точностным характеристикам определения координат воздушных, космических, морских и наземных объектов, [1]. Однако спектр использования системы GPS не ограничивается исключительно решением задач навигации. Одной из возможных областей применения навигационной системы является дистанционное зондирование поверхности.

Использование системы GPS для определения местоположения систем с синтезированием апертуры изучено достаточно давно как для скаттерометрических [2-3], так и для интерферометрических систем [4-5]. Возможность построения карт электрофизических параметров поверхности и, в частности, карт удельной эффективной поверхности рассеяния стали исследовать сравнительно недавно [6-8]. Однако при этих исследованиях не рассматривается возможность построения многопозиционной системы с синтезированием апертуры и, как следствие отсутствует должный анализ качественных характеристик такой системы (оптимальных алгорит-

мов комплексирования результатов наблюдений, анализ энергетики и пространственных функций неопределенности).

В настоящей работе проведено исследование пространственных функций неопределенности многопозиционной системы дистанционного зондирования с синтезированием апертуры антенны (МПРСА), основанной на использовании сигналов навигационных спутников (НС) системы GPS. В рамках этой задачи полагается, что МПРСА состоит из набора передатчиков (НС GPS) и одного приемника – специализированной системы, выполняющей обработку сигналов, отраженных от поверхности, и построение карт электрофизических параметров как функций пространственных координат. Синтез апертуры выполняется за счет взаимного движения передатчиков и приемника. Область обзора определяется пересечением на поверхности следов диаграмм направленности НС и приемника. Поскольку диаграммы направленности НС таковы, что охватывают значительную часть земной поверхности, то область обзора в большинстве практических случаев

будет определяться диаграммой направленности антенны приемника.

Использование предлагаемой системы позволяет существенно повысить качество получаемых оценок за счет совместной обработки сигналов набора разнесенных передающих систем при достаточно низкой себестоимости. Исследование пространственных функций неопределенности (ПФН) предлагаемой МПРСА, являющееся основной целью проведенной работы, актуально и имеет большое научное и практическое значение. Именно эти функции определяют такие важные показатели, как разрешающая способность, энергетическое отношение сигнал/помеха и характеристики шума на радиолокационном изображении.

Геометрия задачи показана на рис. 1.

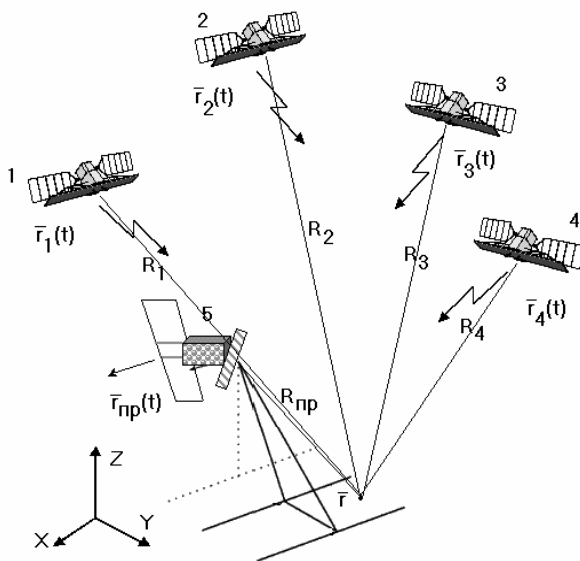


Рис. 1. Геометрия МПРСА

На этом рисунке спутники 1-4 – навигационные спутники системы GPS (передатчики МПРСА), 5 – приемник.

Каждый элемент МПРСА характеризуется вектором состояния $\mathbf{r}(t) = [x(t), y(t), z(t)]$ и расстоянием до точки зондируемой поверхности $R(t, \mathbf{r})$

Будем полагать, что уравнение наблюдения задается в виде аддитивной смеси полезного сигнала

$S(t)$ (сигнала, отраженного от поверхности) и помехи $n(t)$:

$$u(t) = S(t) + n(t).$$

В соответствии с общепринятой практикой аддитивный шум будем полагать нормальным с равномерной спектральной плотностью $N_0/2$ и нулевым средним.

Выражение для полезного сигнала в МПРСА можно записать так:

$$\dot{S}_{Dk}(t) = \text{Re} \sum_{l=1}^N \int_D \dot{K}_k(t, \mathbf{r}) \dot{G}_{Tk}(t, \mathbf{r}) \dot{G}_R(t, \mathbf{r}) \times \dot{F}_k[\mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})] \dot{S}_k(t, \mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где k – номер передатчика; $\dot{K}_k(t, \mathbf{r})$ – коэффициент, учитывающий искажение (в том числе и уменьшение амплитуды) сигнала при распространении от передатчика до точки поверхности \mathbf{r} и к приемнику; $\dot{G}_{Tk}(t, \mathbf{r})$ – диаграмма направленности (ДН) передатчика; $\dot{G}_R(t, \mathbf{r})$ – диаграмма направленности приемной антенны; $\dot{F}_k[\mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})]$ – комплексный коэффициент отражения элемента поверхности \mathbf{r} с вектором электрофизических параметров $\mathbf{p}(\mathbf{r})$, в общем случае зависит от взаимного пространственного положения k -го передатчика, точки поверхности и приемника, [9-10]; $\dot{S}_k(t, \mathbf{r})$ – сигнал, излученный k -м передатчиком и принятый приемником, отличается от излученного задержкой $t_{3k}(t, \vec{r})$.

В системах ДЗ в качестве оценки комплексного коэффициента отражения обычно используется результат корреляционной обработки принимаемого сигнала (опорный сигнал – комплексно сопряженный с отраженным от точки поверхности).

Следовательно, при обработке сигнала k -го передатчика выходной эффект согласованного фильтра $\dot{Y}_k(\mathbf{r}_1)$ можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_k(\mathbf{r}_1) &= \int_0^T u(t) \dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1) dt = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \int_D \dot{F}_j[\mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})] \times \\ &\times \int_0^T \dot{S}_R(t, \mathbf{r}) \dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1) dt d\mathbf{r} + \int_0^T n(t) \dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1) dt = \\ &= \dot{Y}_{Sk}(\mathbf{r}_1) + \dot{Y}_{Ik}(\mathbf{r}_1) + \dot{Y}_{Nk}(\mathbf{r}_1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\dot{Y}_{Sk}(\mathbf{r}_1)$ - сигнальная составляющая; $\dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1)$ - опорный сигнал для k-го передатчика; $\dot{\Psi}_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$ - пространственная функция неопределенности для сигнала, излученного k-м передатчиком и принятого приемником; $\dot{Y}_{Ik}(\mathbf{r}_1)$ - помеховая составляющая, зависящая от степени взаимной ортогональности сигналов различных передатчиков (коэффициента внутрисистемных помех); $\dot{Y}_{Nk}(\mathbf{r}_1)$ - помеховая составляющая, зависящая от характеристик аддитивного шума.

Выражения для сигнальной и помеховых составляющих будут следующими:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{Sk}(\mathbf{r}_1) &= \frac{1}{2} \int_D \dot{F}_k[\mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})] \dot{\Psi}_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) d\mathbf{r}, \\ \dot{Y}_{Ik}(\mathbf{r}_1) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1, \dots, N, j \neq k} \int_D \dot{F}_j[\mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})] \int_0^T \dot{S}_R(t, \mathbf{r}) \dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1) dt d\mathbf{r}, \\ \dot{Y}_{Nk}(\mathbf{r}_1) &= \int_0^T n(t) \dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1) dt. \end{aligned}$$

Для большинства практических случаев интервал синтезирования апертуры антенны достаточно велик по сравнению с периодом повторения ПСП последовательности (1 мс для системы GPS [11]). В этом случае влиянием внутрисистемных помех можно пренебречь и полагать, что $\dot{Y}_{Ik}(\mathbf{r}_1) \approx 0$, т.е.

$$\dot{Y}_k(\mathbf{r}_1) = \frac{1}{2} \int_D \dot{F}_k[\mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})] \dot{\Psi}_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) d\mathbf{r} + \int_0^T n(t) \dot{S}_k^*(t, \mathbf{r}_1) dt.$$

Как видно из последнего выражения, сигнальная часть оценки комплексного коэффициента отражения для бистатической пары k-й передатчик – приемник представляет собой истинное значение оце-

ниваемой функции, сглаженное пространственной функцией неопределенности $\dot{\Psi}_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$. Именно эта функция определяет пространственную разрешающую способность системы ДЗ.

Развернутое выражение для функции неопределенности бистатической пары k-й передатчик – приемник можно записать так:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}_k(t, \vec{r}) \dot{A}_k^*(t, \vec{r}_1) \dot{S}_{0k}[t - t_3(t, \vec{r})] \times \\ &\times \dot{S}_{0k}^*[t - t_3(t, \vec{r}_1)] \exp\{j\omega_0[t_{3k}(t, \vec{r}_1) - t_{3k}(t, \vec{r})]\} dt, \end{aligned}$$

где $\dot{A}_k(t, \vec{r}) = \dot{K}_k(t, \mathbf{r}) \dot{G}_{Tk}(t, \mathbf{r}) \dot{G}_R(t, \mathbf{r})$ - коэффициент, учитывающий искажение сигнала и влияние диаграмм направленности; $\dot{S}_{0k}[t - t_3(t, \vec{r})]$ - комплексная огибающая сигнала передатчика (для системы GPS - фазоманипулированная последовательность, различная для всех НС GPS), ω_0 - несущая частота передатчика (одинаковая для всех НС); $t_{3k}(t, \vec{r})$ - время задержки, связанное с распространением сигнала от k-го передатчика до точки поверхности \mathbf{r} и приемника.

Последнее выражение можно упростить, полагая, что комплексные функции $\dot{A}_k(t, \vec{r})$ и $\dot{A}_k^*(t, \vec{r}_1)$ практически постоянны в области обзора и могут быть вынесены за знак интеграла:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1) &= C \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_0[t - t_3(t, \vec{r})] \dot{S}_0^*[t - t_3(t, \vec{r}_1)] \times \\ &\times \exp\{j\omega_0[t_{3k}(t, \vec{r}_1) - t_{3k}(t, \vec{r})]\} dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как псевдослучайная последовательность НС GPS является периодической, то для обеспечения однозначности отсчета необходимо выполнение условия $Max |t_{3k}(t, \vec{r}_1) - t_{3k}(t, \vec{r})| < T_{ПСП}$, где $T_{ПСП}$ - длительность ПСП дальномерного кода (1 мс, 511 символов).

Для дальнейших рассуждений приведем некоторые геометрические соотношения. Запишем расстояние в системе передатчик – точка поверхности – приемник так:

$$R_k(t, \mathbf{r}) = \|\mathbf{r}_k(t, r) - \mathbf{r}\| + \|\mathbf{r}_{ПР}(t, r) - \mathbf{r}\|,$$

$$\| \mathbf{r}_{ПП}(t, r) - \mathbf{r} \| = R_{ПП0}(\mathbf{r}) \sqrt{1 + \frac{\Delta R_{ПП0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{ПП0}^2(\mathbf{r})}}, \quad (4)$$

$$\| \mathbf{r}_k(t, r) - \mathbf{r} \| = R_{k0}(\mathbf{r}) \sqrt{1 + \frac{\Delta R_{k0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{k0}^2(\mathbf{r})}}, \quad (5)$$

где разделены постоянная во времени $R_{k0}(\mathbf{r})$ и изменяющаяся во времени $\Delta R_{k0}^2(t, \mathbf{r})$ составляющие расстояния до точки поверхности \mathbf{k} для приемника и передатчика, соответственно; $\| \cdot \|$ - знак нормы.

Раскладывая выражения (4), (5) в ряд по малому изменению аргументов

$$\frac{\Delta R_{ПП0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{ПП0}^2(\mathbf{r})}, \frac{\Delta R_{k0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{k0}^2(\mathbf{r})}$$

(на интервале синтезирования апертуры) и ограничиваясь линейными членами, можно записать следующее выражение:

$$t_3(t, \vec{r}) \cong \frac{R_{ПП0}(\mathbf{r}) + R_{k0}(\mathbf{r}) + \frac{\Delta R_{ПП0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{ПП0}(\mathbf{r})} + \frac{\Delta R_{k0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{k0}(\mathbf{r})}}{c},$$

где c - скорость света.

В декартовой системе координат уравнения для расстояний в системе приемник-точка поверхности будут следующими:

$$R_{ПП0}(\mathbf{r}) = \sqrt{[x_{ПП0} - x]^2 + [y_{ПП0} - y]^2 + [z_{ПП0} - z]^2},$$

$$\Delta R_{ПП0}^2(t, \mathbf{r}) = 2[x_{ПП}(t) - x]x_{ПП}(t) + x_{ПП}^2(t) + y_{ПП}^2(t) + 2[y_{ПП}(t) - y]y_{ПП}(t) + 2[z_{ПП}(t) - z]z_{ПП}(t) + z_{ПП}^2(t),$$

где (x, y, z) - координаты точки поверхности.

Аналогично (с точностью до индексов) записываются выражения для расстояния от передатчика до поверхности.

Таким образом, выражение под знаком экспоненты (3) можно разделить на постоянную и изменяющуюся во времени компоненты:

$$\Delta t_{30}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \frac{1}{c} [R_{ПП0}(\mathbf{r}) + R_{k0}(\mathbf{r}) - R_{ПП0}(\mathbf{r}_1) - R_{k0}(\mathbf{r}_1)],$$

$$\Delta t_3(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \frac{1}{c} \left[\frac{\Delta R_{ПП0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{ПП0}(\mathbf{r})} + \frac{\Delta R_{k0}^2(t, \mathbf{r})}{R_{k0}(\mathbf{r})} - \frac{\Delta R_{ПП0}^2(t, \mathbf{r}_1)}{R_{ПП0}(\mathbf{r}_1)} - \frac{\Delta R_{k0}^2(t, \mathbf{r}_1)}{R_{k0}(\mathbf{r}_1)} \right].$$

В последнем выражении можно выделить доплеровскую частоту сигнала, отраженного от произвольной точки поверхности, выполняя дифференцирование $\frac{d\Delta t_3(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}_1)}{dt}$. Эта зависимость определяет вид модуляции точечного сигнала в бистатической паре передатчик – приемник, что, в свою очередь, влияет на разрешающую способность и определяет полосы пропускания частотных фильтров в системе обработки. Эта же зависимость может быть использована при построении систем обнаружения движущихся объектов путем оптимизации траектории движения носителя с целью уменьшить (увеличить) ширину спектра доплеровской частоты сигнала, отраженного от неподвижных объектов.

Результаты моделирования, показывающие изменение доплеровской частоты при различном характере взаимного движения передатчика и приемника, показаны на рис.2. При моделировании предполагалось, что диаграмма направленности приемной антенны ориентирована перпендикулярно вектору скорости ЛА.

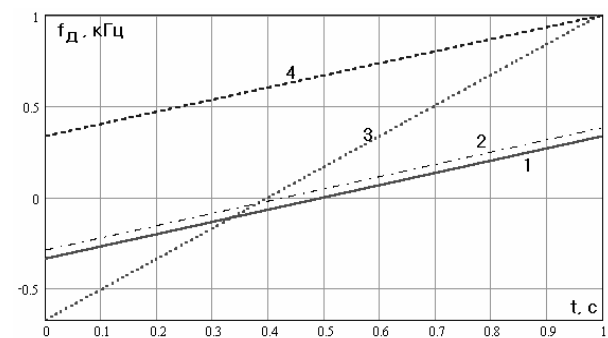


Рис.2. Поведение доплеровской частоты
1 – параллельное движение передатчика и приемника с одинаковыми скоростями; 2 – встречное движение с одинаковыми скоростями; 3 – параллельное движение с разными скоростями; 4 – параллельно-противоположное движение с одинаковыми скоростями.

Характер зависимости позволяет определить полосы пропускания частотных фильтров и ширину спектра сигнала, отраженного от зондируемой поверхности D .

Для исследования пространственных функций неопределенности использовались результаты определения вектора состояния навигационных спутников GPS г. Москве 19.02.03 в 13.24. Орбитальная группировка навигационных спутников показана на рис. 3.

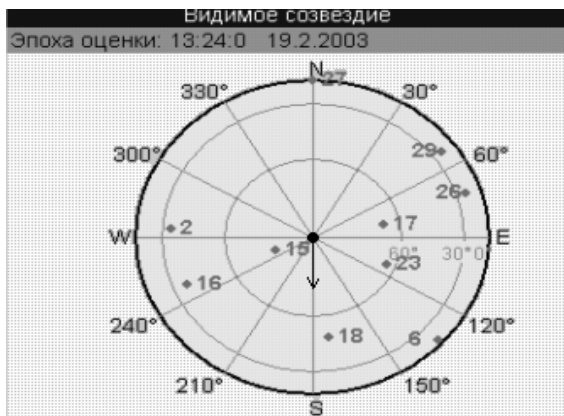


Рис.3. Орбитальная группировка НС GPS

В ходе моделирования использовались следующие параметры приемного устройства: время синтеза апертюры – 0.5 сек, приемник расположен в точке с относительными координатами (0,0,7000 м), вектор его скоростей в декартовой системе координат (500 м/с,0,0), область обзора расположена перпендикулярно вектору скорости и находится на расстоянии 2000 м (рис.3). Методика моделирования аналогична приведенной в [12].

Оценить разрешающую способность а дальномерной плоскости можно исходя из взаимного положения приемника и НС и протяженности ФН излучаемого сигнала по времени, которая для фазоманипулированных последовательностей определяется длительностью одиночного импульса (1 мс для системы GPS). Очевидно, что чем больше угол взаимного возвышения, тем выше разрешающая способность в дальномерной плоскости. Для НС, находящихся на больших возвышениях, функции неопределенности показаны на рис. 4- 8.

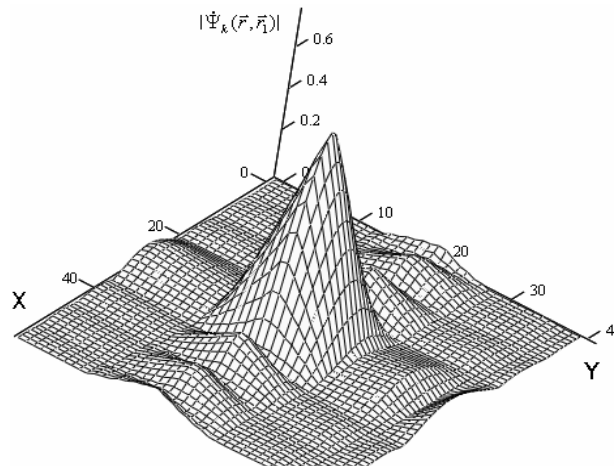


Рис.4. Модуль ПФН 15 НС системы GPS

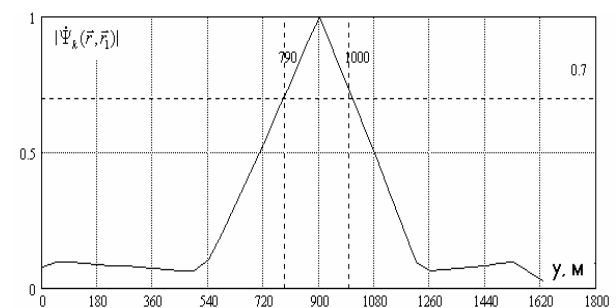


Рис.5. Сечение модуля функции неопределенности, показанной на рис.4. Дальномерная плоскость

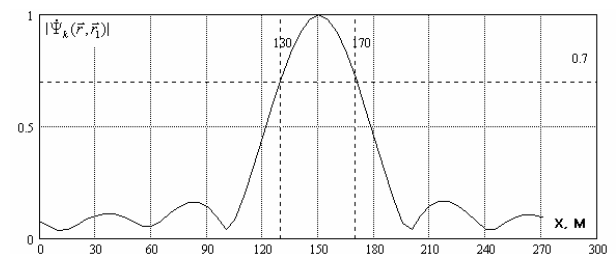


Рис.6. Сечение модуля функции неопределенности, показанной на рис.4. Азимутальная плоскость

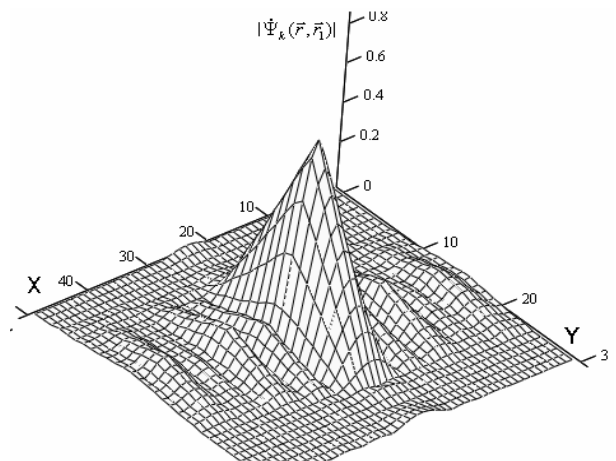


Рис.7. Модуль ПФН 17 НС системы GPS

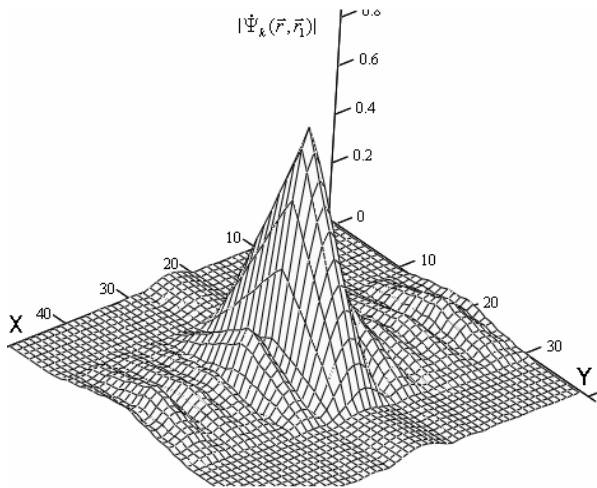


Рис.8. Модуль ПФН 23 НС системы GPS

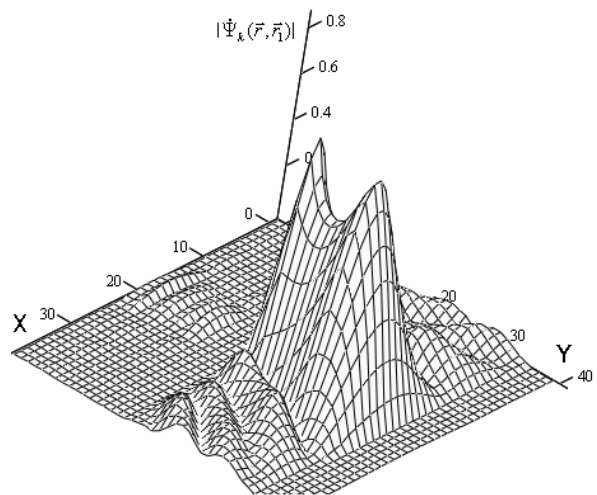


Рис.10. Модуль ПФН 29 НС системы GPS

Если же угол возвышения передатчика невелик, то пространственная функция неопределенности в дальномерной плоскости увеличивается пропорционально уменьшению угла возвышения. Результаты моделирования пространственных функций неопределенности для таких НС показаны ниже на рис.9 – 11.

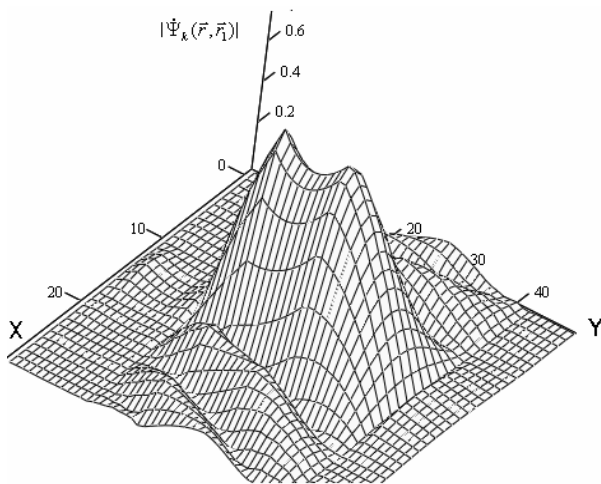


Рис.9. Модуль ПФН 6 НС системы GPS

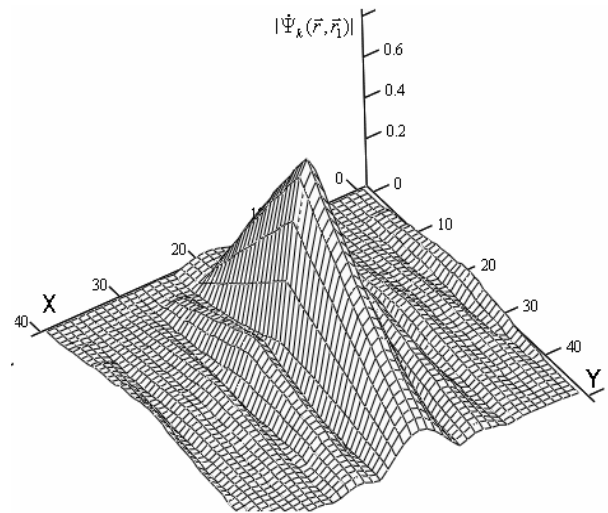


Рис.11. Модуль ПФН 26 НС системы GPS

Таким образом, в ходе моделирования были получены следующие результаты: разрешающая способность МПРСА, в которой используются сигналы, излученные НС системы GPS, способна обеспечить разрешение порядка 200 и 50 м в азимутальной и дальномерной плоскостях.

Результаты моделирования пространственных функций неопределенности, полученные при использовании реальных данных о видимом созвездии навигационных спутников и векторе их положения, показали возможность получения разрешений порядка 200X50 м (в дальномерной и азимутальной плоскости, соответственно).

Разрешающая способность существенно зависит от взаимного положения и характера движения передатчика и приемника, типа излучаемого сигнала, диаграмм направленности и характера пространственного движения приемника и передатчика. Путем

оптимизации можно существенно увеличить разрешение как в дальномерной, так и в азимутальной плоскости.

Заключение

Навигационная система GPS может использоваться для построения многопозиционной системы дистанционного зондирования с синтезированием апертуры антенны. Обеспечиваемое разрешение является вполне достаточным для решения многих задач дистанционного зондирования. Дальнейшим развитием исследования может являться оптимизация траектории движения приемника, диаграммы направленности приемной антенны, метода обзора и алгоритмов обработки. Такая оптимизация позволит существенно повысить разрешающую способность рассматриваемой многопозиционной системы.

Литература

1. Harmon R. Joint US/USSR Satellite Navigation Studies // GPS word. – 1992. Vol. 3. №2.
2. Young Brian. An integrated synthetic aperture radar / Global positioning system/Internal navigation system for Target geolocation improvement // MS thesis, AIF/GE/ENG/99M-32, 1999.
3. Layne J. Integrated synthetic aperture radar and navigation systems for targeting applications // WL-TR, Air force avionics, 1997.
4. Ge L., Han S., Rizos C. The double interpolation and double prediction approach for InSAR and GPS integration // IAPRS. Amsterdam, 1996. - Vol. 33.
5. Linlin G., Rizos C. Mining subsurface monitoring using InSAR and GPS approach // IJRS. – 1996. - vol. 17.
6. Garrison J., Katzberg S. The application of reflected GPS signal to ocean and wetland remote sensing // 5th international conference on remote sensing for marine and coastal studies. San Diego, CA. – 1999. Vol.1. – P. 522-529.
7. Zavorotny V., Voronich A. Scattering of GPS signals from ocean with wind remote sensing application // IEEE trans. Geosci. Remote Sensing. - 2000. - Vol. 38. - No 2. – P. 951-954,
8. Wu, Meechan, Young. The potential use GPS signals as ocean altimetry observables // Proc. ION, Santea Mexico, CA. Jan. 1998.
9. Радиолокационные методы исследования земли / Под ред. Ю.А. Мельника -М.: Сов. радио, 1980.- 264 с.
10. Волосюк В.К. Физические основы дистанционного зондирования природных сред радиотехническими средствами аэрокосмического базирования. –Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1997.- 98 с.
11. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС / Болдин В.А., Зубинский В.И., Зурабов Ю.Г., Иванов Н.Е. и др./ Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина .- М.:ИПРЖР, 1998.- 400 с.
12. Ксендзук А.В. Исследование функций неопределенности в радиосистемах с синтезированием апертуры // Авиационно-космическая техника и технология. –Х., ХАИ.- 2000.- Вып. 21.- С. 148-152.

Поступила в редакцию: 03.02.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Волосюк В.К., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.