

**В.К. ВОЛОСЮК<sup>1</sup>, А.В. КСЕНДЗУК<sup>1</sup>, И.А. ЕВСЕЕВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

<sup>2</sup>*Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Украина*

## **МНОГОПОЗИЦИОННАЯ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ**

Предложены принципы построения многопозиционной РЛС с синтезированной апертурой (МПРСА) с использованием в качестве передающих позиций спутников глобальных навигационных систем типа GPS/ГЛОНАСС. Представлены результаты энергетического расчета МПРСА, показана принципиальная возможность и перспективность создания такой системы

**многопозиционная РЛС, синтезированная апертура, навигационные системы, функция неопределенности, энергетический расчет, разрешающая способность**

### **Введение**

Непрерывное повышение требований к объему и качеству радиолокационной информации, помехозащищенности и живучести радиолокационных средств вынуждает развивать новые направления в области методов радиолокации.

Современные средства воздушного нападения готовы к борьбе с традиционными совмещенными РЛС. Поэтому перспективные системы обнаружения должны для сохранения живучести в боевых условиях иметь разнесенные передающие и приемные позиции. Дорогостоящая аппаратура должна быть сосредоточена на приемной позиции. Передающих позиций желательно иметь.

В последнее время развивается нетрадиционное построение систем - многопозиционные радиолокационные комплексы, в том числе пассивные и активно-пассивные, скрытые от разведки.

Для сохранения преимуществ многопозиционной системы целесообразно использовать в качестве передающих позиций существующие системы, даже не предназначенных для этих целей [1, 2].

В данной работе предлагается использовать в качестве передающих позиций навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС, а приемник располагать на воздушной (космической) платформе. Использование в качестве передающей позиции спутников GPS/ГЛОНАСС дает следующие преимущества:

1. Не требуется специально выделенных передатчиков.

2. Малое потребление мощности.

3. GPS/ГЛОНАСС круглосуточно работают, сигналы системы охватывают поверхность всей земли.

4. Известна структура GPS/ГЛОНАСС сигнала.

Создание этих систем связано с прогрессом в области создания аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС.

Для высокого разрешения по азимуту предлагается использовать синтезирование апертуры антенны, а разрешение по дальности реализовать за счет использования широкополосного сигнала (ФКМ). Синтезирование апертуры осуществляется за счет взаимного движения передатчика и приемника.

Использование отраженных сигналов GPS как источника «подсветки» в РЛ ДЗЗ было предложено Казбергом и Гаррисоном. С 1998 г. проводятся исследования по использованию отраженных сигналов GPS как источника «подсветки» в РЛ ДЗЗ [3-5].

Было признано, что отраженные сигналы GPS от морской поверхности содержат информацию о высоте волн, которая зависит от скорости ветра на поверхности. Произведены эксперименты по измерению поверхностной волны.

Кроме того, коэффициент отражения от земли на частоте L1 GPS (1,575 ГГц) чувствителен к влажностному состоянию поверхности земли.

## 1. Постановка задачи

Комбинация передатчиков GPS/ГЛОНАСС многоканального приемника и объектов может рассматриваться как многопозиционная радиолокационная система с синтезированием апертуры. Необходимость когерентного накопления вызвана низким уровнем мощности отраженных от земли сигналов радионавигационных спутников. Для определения потенциальной возможности такой системы проведем расчет энергетического соотношения сигнал/помеха и найдем функцию неопределенности.

## 2. Расчет энергетика многопозиционной РСА

Проведем оценку энергетика радиолинии навигационный спутник – наземный объект – приемник (на воздушной платформе). В РЛС с синтезированной апертурой выполняется когерентное сложение сигналов. В качестве исходной можно взять формулу для отношения энергии сигнала в одном импульсе к спектральной плотности мощности шума

$$R_u = \frac{2E_u}{N_o} = \frac{2P_u \tau_u S_a^2 \sigma}{(4\pi) N_o \lambda^2 d_1^2 d_2^2} = \frac{2P_u \tau_u \lambda^2 G_{nep} G_{np} \sigma}{(4\pi)^3 N_o d_1^2 d_2^2}. \quad (1)$$

Отношение энергии сигнала к шуму после обработки сигналов увеличивается по сравнению с величиной  $R_u$  в число раз, равное количеству принимаемых импульсов

$$R_{pca} = R_u N_u. \quad (2)$$

Количество импульсов зависит от длины синтезированной апертуры  $L_c$ , скорости полета  $V_c$  и частоты повторений импульсов  $F_u$

$$N_u = \frac{L_c}{V_c} F_u = T_c F_u, \quad (3)$$

где  $T_c$  - интервал синтезирования апертуры.

Эффективная площадь отражения поверхностной цели для РСА равна:

$$\sigma = \sigma_y \delta D \delta l_{az}, \quad (4)$$

где  $\sigma_y$  - удельная ЭПО,  $\delta D$  - разрешение по дальности,  $\delta l_{az}$  - разрешение по азимуту.

Подставим в формулу (2) величины  $R_u$ ,  $N_u$ ,  $\sigma$ , определяемые формулами (1), (3), (4)

$$R_{pca} = \frac{2P_u \tau_u \lambda^2 G_{nep} G_{np} \sigma_y \delta D \delta l_{az} T_c F_u}{(4\pi)^3 N_o d_1^2 d_2^2}. \quad (5)$$

Т.к.  $P_{cp} = P_u \tau_u F_u$ , то окончательно запишем

$$R_{pca} = \frac{2P_{cp} \lambda^2 G_{nep} G_{np} \sigma_y \delta D \delta l_{az} T_c}{(4\pi)^3 N_o d_1^2 d_2^2 \kappa_n}, \quad (6)$$

где  $G_{np} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}$ ;  $\kappa_n$  - коэффициент, учитывающий дополнительные потери.

В табл. 1 представлены значения отношения сигнал/шум на входе при различных дальности от объекта до приемника  $d_2$ , размерах апертуры приемной антенны  $S$ , интервала наблюдения  $T_c$  и требованиях к качеству радиолокационного изображения (РЛИ) (различных значениях  $\delta D$  и  $\delta l_{az}$ ). При этом принимались следующие значения параметров:  $\lambda = 0,18$  м,  $d_1 = 19,1 \cdot 10^6$  м,  $P_{nep} = 64$  Вт,  $G_{nep} = 10$  дБ,  $\sigma_y = 0,05$  м<sup>2</sup>,  $N_o = 4,003908 \cdot 10^{-21}$ , раскрыв приемной антенны  $S = 1,5$  м<sup>2</sup> / 2 м<sup>2</sup>,  $\kappa_n = 10$  дБ.

Для надежной работы системы дистанционного зондирования значение отношения сигнал/помеха должно превышать 10...12 дБ [7].

Результаты расчета свидетельствуют, что навигационные системы GPS/ГЛОНАСС могут быть использованы для создания авиационных РСА с высокой и средней разрешающей способностью.

Расчет проводился при использовании в качестве передающей позиции одного спутника.

## 3. Функция неопределенности

Практически все задачи радиолокационного наблюдения, как в однопозиционных так и многопозиционных системах можно решать и анализировать, исследуя ФН применяемых сигналов с учетом особенностей структуры многопозиционной системы. В многопозиционной системе и, в частности, в двухпозиционной системе задержка сигнала, отраженного от цели, по отношению к моменту излучения, доплеровские сдвиги частоты принимаемого

Значения отношения сигнал/шум на входе

$\delta D$ (м) $\times$ $\delta l_{\dot{a}\zeta}$ (м)		$d_2, м$				
		$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
$R_{PCA}, дБ$	$T_c = 1 с$					
	$10 \times 10$	6.2 / 7.5	0.8 / 1.5	-3 / -2	-6 / -5	-8 / -6
	$20 \times 20$	12.5 / 14	6.5 / 8	3 / 4	0 / 1.5	-1 / -0.5
	$40 \times 40$	18.5 / 20	12.5 / 14	9 / 10	6.3 / 8	4.5 / 6
	$T_c = 2 с$					
	$10 \times 10$	9.5 / 11	3 / 5		-3 / -1	-5 / -4
	$20 \times 20$	15.5 / 16	9 / 11	6 / 7	3 / 5	1 / 3
	$40 \times 40$	22 / 23	15 / 17	12 / 13	9 / 10.5	8 / 9

сигнала зависят от конфигурации системы. В общем случае нет линейной связи между временем задержки и расстоянием до цели. Доплеровская частота принимаемого сигнала не связана линейной зависимостью с относительным движением цели и приемной позиции и существенно зависит от конфигурации системы и скорости передающей позиции.

Для упрощения рассмотрим двухпозиционный вариант как ячейку многопозиционной PCA.

Структуры двухпозиционных систем и их основные геометрические соотношения изучены достаточно полно [11, 12]. Однако для определения ФН сигналов в многопозиционной системе с использованием навигационных спутников GPS/GLONASS дадим некоторые уточнения.

Рассмотрим, как связана задержка во времени с расстоянием, а также найдем связь доплеровского сдвига принимаемого сигнала и скорости цели.

На рис. 1 показана многопозиционная PCA в бистатическом варианте, в которой передатчик и приемник расположены в различных позициях и движутся с различными скоростями.

Видимый спутник  $Tr_j$  (the transmitter) является источником излучения непрерывного сигнала и движется со скоростью  $\vec{V}_{Tr_j}$ . Приемник  $R$  (the receiver) движется со скоростью  $\vec{V}_R$ . Движение объекта  $O_i$  характеризуется  $\vec{V}_{O_i}$ .

Диапазоны изменения дальностей между пере

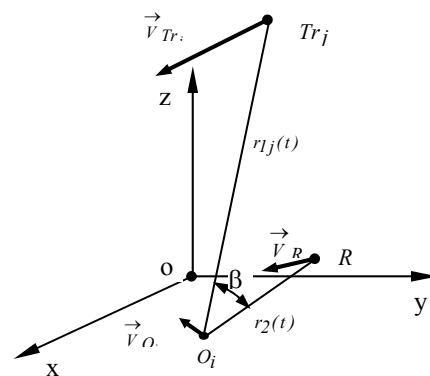


Рис. 1. Многопозиционная PCA

датчиком, целью и приемником

$$r_{1j}(t) = \left| \vec{R}_{1j} + \left( \vec{V}_{Tr_j} - \vec{V}_{O_i} \right) t \right|$$

$$r_2(t) = \left| \vec{R}_2 + \left( \vec{V}_R - \vec{V}_{O_i} \right) t \right|.$$

Представим сигнал, излученный спутником GPS, в виде

$$S_{Tr_j}(t) = d(t) * Re[A exp(jw_c t)],$$

где  $d(t)$  C/A (или P) код;  $w_c$  - несущая частота.

Сигнал, принимаемый в точке  $O_i$ , в комплексной форме

$$S_{O_i}(t) = r[t - t_{td}] kFA exp[jw_c(t - t_{td})],$$

где  $t_{td} = \frac{r_{1j}(t)}{c}$  - время задержки сигнала от спутника до объекта  $O_i$ ;  $c$  - скорость света;  $F$  - коэффициент отражения.

Частота принятого сигнала приемником

$$f_R(t) = f_c + f_D,$$

где  $f_D = f_{1j}(t) + f_2(t)$ .

Доплеровская частота в разнесенной системе, в общем случае, определяется производной по времени от суммарного расстояния  $r_\Sigma$

$$f_D = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{dr_\Sigma}{dt} \right].$$

Доплеровский сдвиг частоты сигнала, вызванный движением передатчика  $T_r$  и объекта  $O_i$

$$f_{1j}(t) \approx -\frac{1}{\lambda} \frac{1}{R_{1j}} \left[ \left| \vec{V}_{Trj} - \vec{V}_{O_i} \right|^2 + R_{1j} \left| \vec{V}_{Trj} - \vec{V}_{O_i} \right| \cos \gamma_{Trj} \right],$$

$$\left( \text{если } R_{1j} \gg \left| \vec{V}_{Trj} - \vec{V}_{O_i} \right| * t \right),$$

где  $\gamma_{Trj}$  - угол между  $\vec{V}_{Trj}$  и  $\vec{V}_{O_i}$ ,  $\lambda$  - длина волны сигнала спутника.

Если среда распространения не искажает структуру электромагнитного поля, то отраженный от точечного объекта  $O_i$  и принимаемый приемником  $R$  сигнал можно записать в виде

$$S_R(t) = r \left[ t - \frac{r_{1j}(t) + r_2(t)}{c} \right] kF \times \left\{ A \exp \left[ jw_{O_i}(t) \left[ t - \frac{r_2(t)}{c} \right] \right] \right\},$$

где  $w_{O_i}(t) = 2\pi [f_c + f_{1j}(t)]$ .

Доплеровское смещение частоты сигнала от объекта  $O_i$  к приемнику  $R$

$$f_2(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[ w_{O_i}(t) \frac{r_2(t)}{c} \right] \cos \gamma_R,$$

где  $\gamma_R$  - угол между  $\vec{V}_{O_i}$  и  $\vec{V}_R$ .

Для нахождения предельных характеристик пространственной селекции полагаем, что прием отраженных сигналов производится на фоне белого аддитивного шума. В этом случае оптимальной операцией обработки является когерентное суммирование сигналов, т.е. согласованная обработка траекторного сигнала, при которой вычисляется

сигнал

$$S_{ij}(\tau) = \int_{-\frac{T_s}{2}}^{\frac{T_s}{2}-\tau} S_R(t+\tau) S_R^*(t) dt,$$

где  $T_s$  - время наблюдения.

Разрешающая способность РСА определяется в основном фазовой характеристикой траекторного сигнала, а амплитудная характеристика влияет на форму выходного сигнала.

Для анализа влияния на разрешение только апертуры полагаем амплитудный множитель в выражении постоянным (влияние на разрешающую способность амплитудной весовой функции известно [9, 10]).

Нормированное значение выходного сигнала согласованного фильтра для прямоугольной огибающей сигнала с линейной частотной модуляцией

$$\psi_s [S_{ij}(\tau)] = \int_{-\frac{T_s}{2}}^{\frac{T_s}{2}-\tau} \exp(j k_{aij} \tau t) dt = \frac{T_s}{2} \sin c \left[ \frac{1}{2} k_{aij} \tau (T_s - |\tau|) \right],$$

$$\text{где } k_{aij} \approx -\frac{2\pi}{\lambda R_{1j}} \left| \vec{V}_{Trj} - \vec{V}_{O_i} \right|^2 - \frac{2\pi}{\lambda R_2} \left| \vec{V}_R - \vec{V}_{O_i} \right|^2$$

Т.к. обычно выполняется условие  $T_s \gg |\tau|$

$$\psi_s [S_{ij}(\tau)] = \sin c \left[ k_{aij} \tau \frac{T_s}{2} \right]. \quad (7)$$

Линейное разрешение по азимуту определяется величиной протяженности сигнала, отраженного от цели, после сжатия по оси  $x$ . Протяженность этого сигнала найдем как величину, обратную ширине спектра  $\Delta f_c = \Delta f_m = 2f_D$ .

Тогда потенциальная разрешающая способность по оси  $X$

$$\rho_x \approx \frac{\lambda}{T_s} \frac{\left| \vec{V}_{Trjx} - V_{O_{ix}} \right| + \left| \vec{V}_{Rx} - V_{O_{ix}} \right|}{\frac{\left| \vec{V}_{Trj} - \vec{V}_{O_i} \right|^2}{R_{1j}} + \frac{\left| \vec{V}_R - \vec{V}_{O_i} \right|^2}{R_2}}.$$

## Выводы

С помощью (7) возможно анализировать свойства радиолокационного сигнала, применяемого в двухпозиционной системе, оценивать разрешающую способность по дальности и скорости целей, выявлять неоднозначности в процессе оценивания координат. Кроме того, ФН позволяет определить особенности обработки сигналов, которые появляются в результате изменений геометрических параметров двухпозиционной системы в зависимости от положения цели по дальности, угловых координат и двухпозиционного угла.

Результаты расчета показывают, что навигационные системы GPS/ГЛОНАСС могут быть использованы для создания авиационных РСА с высокой и средней разрешающей способностью.

При обработке необходимо использовать максимальное число навигационных спутников, находящихся в зоне видимости приемного устройства и максимально увеличивать время синтеза апертуры.

Исследование и разработка многопозиционных РСА являются перспективными; необходимы теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении.

## Литература

1. P. Howland. Target tracking using television-based bistatic radar," IEE Proc. -Radar, Sonar Navig. 146, pp. 166-174, Jun 1999.
2. Silent Sentry™ Passive Surveillance J. Baniak, Dr. Gr. Baker, Ann Marie Cunningham, L. Martin. Aviation Week and Space Technology, June 7, 1999
3. J. Garrison, S. Katzberg, C. Howell III. Detection of ocean reflected GPS signals: theory and experiment, In Proceedings of the IEEE Southeastcon'97: Engineering the New Century, pp. 290-294, 1997.
4. V. Zavorotny, A. Voronovich. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing

application, IEEE Trans Geosci. Remote Sens., vol. 38, No. 2, pp.951-964, March, 2000.

5. Zuffada, C., and T. Elfouhaily 2000: Determining wind speed and direction with ocean reflected GPS signals. In Proc. Sixth Int. Conf. Remote Sens. Marine Coast. Environ., Vol. II, Charleston, SC, pp. 429-435.

6. Энергетические характеристики космических радиолоний. Под ред. О.А. Зенкевича. М.: Сов. радио, 1972. – 435 с.

7. Радиотехнические системы дистанционного зондирования / С.Е. Фалькович, В.К. Волосюк, О.А. Горбуненко. Учебное пособие. – Харьков «ХАИ», 2002. – 156 с.

8. Ксендзук А.В. Исследование функций неопределенности в радиосистемах с синтезированием апертуры // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, ХАИ. – 2000. – Вып. 21. – С. 148-152.

9. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны. / Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др./ Под ред. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988.- 304 с.

10. Г.С. Кондратенков, В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов. Радиолокационные станции обзора Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радио и связь, 1983. - 272 с.

11. Varshney P.K. Ambiguity Function for a Bistatic Radar. – IEEE Trans., 1997, vol.AEA-33, No 7, December.

12. Jackon M.C. The geometry of Bistatic Radar. – IEE Proceeding, 1986, vol. 133, Pt. F, No 7, December.

*Поступила в редакцию 17.10.03*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор Бутакова С.В., Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков