знаходження КА в зоні радіовидимості наземного вимірювального пункту (НВП) на кожному витку РКО.

У подальших дослідженнях доцільно детальніше проаналізувати вплив складу витків на точність вирішення задачі уточнення параметрів руху КА.

1. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. М.:– Советское радио, 1978. – 384с.
2. *Эльясберг П.Е.* Определение движения по результатам измерений. - М.: Наука, 1976. – 416с.
3. *Брахман Т.Р.* Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288с.
4. *Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. –К: Наук. думка, 1992. – 160с.*
5. *Козелков С.В.* Наземный радиотехнический комплекс управления и идентификации космических аппаратов двойного назначения среднего и дальнего космоса: Дис.докт.тех.наук: 05.17.21.- Харьков,2000.- 457с.

Поступила 25.08.2010р.

УДК 621.391

С.Т. Черепков[1], В.В. Юсов[2]
[1]Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления, Киев
[2]Центральное управление метрологии и стандартизации, Киев

АНАЛИЗ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ШУМОПОДОБНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассматриваются вопросы исследования функции неопределенности шумоподобных пространственно-временных сигналов. Проанализированы потенциальные преимущества измерительной системы со сложными пространственно-временными сигналами.

Введение. Измерительные радиосистемы получают информацию о различных удаленных объектах путем анализа волновых полей, создаваемых этими объектами в результате собственного излучения, отражения либо переизлучения зондирующих сигналов [1]. Эти поля, поступающие на вход приемной системы и являющиеся носителями полезной информации, по своей природе представляют собой пространственно-временные процессы. Структура и характеристики такого пространственно-временного процесса (волнового поля), рассматриваемые в области, где осуществляется его анализ, полностью определяется как положением и скоростью движения объекта относительно этой области, так и характеристиками самого объекта (его размеров, формы и т.д.). Помимо этого полезного поля, несущего информацию о наблюдаемых объектах, могут приниматься поля, создаваемые другими объектами, а также различными источниками помех.

Анализ литературы показал, что исходя из решаемых задач и выбранной модели измерительной радиосистемы могут быть предложены следующие модели зондирующих пространственно-временных сигналов [1,2]

- простые (элементарные) пространственно-временные сигналы,
- сложные (шумоподобные) пространственно-временные сигналы,
- объемные (простые) пространственно-временные сигналы,
- составные объемные сигналы.

Использование сложных диаграмм направленности в качестве передающих позволяет формировать зондирующие пространственно-временные сигналы, отличающиеся сложной (шумоподобной) структурой как по временной так и по пространственным координатам.

В связи с этим **целью статьи** является исследование влияния параметров и характеристик сигнала при использовании простых и сложных пространственно-временных сигналов для измерительной радиосистемы.

Изложение основного материала. Конкретный вид функции неопределенности зависит от типа используемого пространственно-временного сигнала. Рассматривая характеристики пространственно-временного сигнала, мы акцентировали внимание в основном на его пространственных характеристиках, осуществляя его кодирование по пространственным координатам. Соответственно полагалось, что единственным существенным параметром сигнала является направление его прихода либо излучения. Однако, при используемом нами подходе этот пространственный код не является фиксированным, он динамичен – изменяется во времени, что приводит к взаимозависимости пространственных и временных характеристик сигнала. Изменение пространственных координат непосредственно отображается на изменении временных параметров и наоборот. Поэтому наличие в сигнале других существенных параметров, например, времени задержки, характеризующего дальность до объекта, приведет к неоднозначности отсчета других параметров, требующей своего разрешения. Однако, как будет показано в дальнейшем, при рассмотрении конкретных вопросов применения сложных зондирующих пространственно-временных сигналов разрешение вопросов неоднозначности измерений существенно не влияет на структуру сигналов. В соответствии с этим будем полагать, что единственным существенным параметром сигнала является направление его прихода (излучения). Другие параметры будем полагать известными и не подлежащими оценке. Исследование функции неопределенности

$$\Psi(\tau;\eta) = c\left|\iint\limits_{-\infty}^{\infty} s(t;\theta)\, s^{*}(t-\tau;\theta-\eta)\, dt\, d\theta\right|. \quad (1)$$

Проведем для общего случая, не привязываясь к конкретной структуре пространственно-временного сигнала и не задавая его формы, кроме некоторых ее показателей, таких как, например, постоянство модуля комплексной огибающей сигнала на интервалах его существования $|t| \le T;\quad |\theta| \le \theta_M$ и ограниченность ширины спектра его пространственных $2F_{пр}$ и временных $2F_{BP}$ частот [4].

В соответствии с этим для нахождения функции неопределенности (1) воспользуемся общим определением пространственно-временного сигнала (2) и

$$s(t;\theta) = |s(t;\theta)| \exp\{j\varphi(t;\theta)\} \tag{2}$$

где $s(t;\theta)$ – комплексная огибающая сигнала определяемая видом используемой модуляции, а φ_0 – начальная фаза.

учитывая ограниченность его пространственного и временного спектров, представим его в виде разложения в двумерный ряд Котельникова [5]

$$\begin{aligned} s(t;\theta) = s_0 \exp\{j\varphi(\theta;t)\} = s_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \exp\{j\varphi(k\Delta\theta;\\ l\Delta t)\} \sin c 2\pi F_{пр}(\theta - k\Delta\theta) \sin c 2\pi F_{BP}(t - l\Delta t). \end{aligned} \tag{3}$$

В дальнейшем при использовании представлений типа (3) при условии $2T/\Delta t \quad 1;\quad 2\theta_M/\Delta\theta \quad 1$ будем учитывать только те члены ряда (3), которые попадают в диапазон параметров реального существования сигнала $|t| \le T;\quad |\theta| \le \theta_M$.

$$\begin{aligned} s(t;\theta) \quad s_0 \sum_{k=-m}^{m} \sum_{l=-n}^{n} \exp\{j\varphi(k\Delta\theta; l\Delta t)\} \times \\ \times \sin c 2\pi F_{пр}(\theta - k\Delta\theta) \sin c 2\pi F_{BP}(t - l\Delta t). \end{aligned} \tag{4}$$

Подставляя (4) в (1), получаем

$$\begin{aligned} \Psi(\tau;\eta) = c \Bigg| \sum_{k=-m}^{m} \sum_{l=-n}^{n} \sum_{p=-m}^{m} \sum_{q=-n}^{n} \int_{-T}^{T} \int_{-\theta_M}^{\theta_M} \exp\{j[\varphi(k\Delta\theta; l\Delta t) - \\ \varphi[(p\Delta\theta - \eta; q\Delta t - \tau)]]\} \sin c 2\pi F_{пр}(\theta - k\Delta\theta) \sin c 2\pi F_{BP}(t - l\Delta t) \times \\ \sin c 2\pi F_{пр}[(\theta - \eta) - p\Delta\theta] \sin c 2\pi F_{BP}[(t - \tau) - q\Delta t] \, dt d\theta \Bigg|. \end{aligned} \tag{5}$$

Учитывая ортогональность функции отсчетов для различных $k\Delta\theta$ и $l\Delta t$, т.е.

$$\begin{aligned} \int_{-\theta_M}^{\theta_M} \sin c 2\pi F_{пр}(\theta - k\Delta\theta) \sin c 2\pi F_{пр}(\theta - p\Delta\theta) \, d\theta \quad 0;\ k \ne p, \\ \int_{-T}^{T} \sin c 2\pi F_{BP}(t - l\Delta t) \sin c 2\pi F_{BP}(t - q\Delta t) \, dt \quad 0;\ l \ne q, \end{aligned} \tag{6}$$

приходим к следующей записи выражения (5)

$$\Psi\left(\tau;\eta\right)=\left|\sum_{k=-m}^{m}\sum_{l=-n}^{n}\int_{-T}^{T}\int_{-\theta_M}^{\theta_M}\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta-k\Delta\theta\right)\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta-\eta-k\Delta\theta\right)\times\right. \tag{7}$$

$$\left.\times\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t-l\Delta t\right)\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t-\tau-l\Delta t\right)dtd\theta\right|.$$

Интегралы в (7) можно представить в виде следующих приближенных соотношений

$$\int_{-\theta_M}^{\theta_M}\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta-\theta_1\right)\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta-\theta_2\right)d\theta$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta-\theta_1\right)\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta-\theta_2\right)d\theta=\Delta\theta\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\left(\theta_1-\theta_2\right); \tag{8}$$

$$\int_{-T}^{T}\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t-t_1\right)\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t-t_2\right)dt$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t-t_1\right)\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t-t_2\right)dt=\Delta t\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\left(t_1-t_2\right).$$

Подставляя (8) в (7) и учитывая, что

$$2n+1=\frac{2T}{\Delta t},\qquad 2n+1=\frac{2\theta_M}{\Delta\theta}, \tag{9}$$

окончательно получаем следующее выражение для пространственно-временной функции неопределенности сложных сигналов

$$\Psi\left(\tau;\eta\right)=c\left|s_0^2\,2T2\theta_M\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\eta\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\tau\right|. \tag{10}$$

Как следует из (10) функция неопределенности сложного пространственно-временного сигнала может быть представлена в виде произведения двух функции – временной

$$\Psi\left(\tau\right)=c\left|\sqrt{s_0^2\,2T2\theta_M}\operatorname{sin c}2\pi F_{BP}\tau\right|. \tag{11}$$

и пространственной

$$\Psi\left(\eta\right)=c\left|\sqrt{s_0^2\,2T2\theta_M}\operatorname{sin c}2\pi F_{np}\eta\right|, \tag{12}$$

характеристики которых определяются соответственно временными F_{BP} и пространственными F_{np} параметрами сигнала. Здесь наблюдается аналогия с функцией неопределенности простых (элементарных) сигналов $\Psi\left(\tau;\eta\right)=\Psi\left(\tau\right)\Psi\left(\eta\right)$. Однако, совпадение здесь только внешнее. В действительности же при используемых методах построения моделей аналоговых и дискретных пространственно-временных сигналов осуществляется по сути дела сканирование фазовой характеристики сигнала (диаграммы направленности) в секторе обзора. Это приводит к взаимооднозначной зависимости между пространственными и временными характеристиками сигнала и соответственно функции неопределенности

$$\tau = \eta \frac{T}{\theta_M};$$
$$\eta = \tau \frac{\theta_M}{T}. \qquad (13)$$

И при отсутствии других существенных параметров сигнала, при условии которых получено выражение (10), изменение любого из параметров $\tau(\eta)$ ведет к однозначному изменению другого – $\eta(\tau)$.

Соответственно так же связаны значения временных и пространственных частот

$$2F_{BP} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta\theta \frac{T}{\theta_M}} = 2F_{np} \frac{\theta_M}{T};$$
$$2F_{np} = \frac{1}{\Delta\theta} = \frac{1}{\Delta t \frac{\theta_M}{T}} = 2F_{BP} \frac{T}{\theta_M}. \qquad (14)$$

Если в (14) подставить значение пространственных частот $F_{np} = 2\chi_M$, то приходим к следующей записи соотношений (14)

$$2F_{BP} = 2\chi_M \frac{\theta_M}{T} = 2F_M;$$
$$2F_{np} = 2F_M \frac{T}{\theta_M}, \qquad (15)$$

что приводит к следующей связи функций $\Psi(\tau)$ и $\Psi(\eta)$

$$\Psi(\tau) = \sin c 2\pi F_{BP}\tau = \sin c 2\pi\chi_M \tau \frac{\theta_M}{T} = \sin c 2\pi F_{np}\eta;$$
$$\Psi(\tau) = \Psi(\eta) \qquad (16)$$

и соответственно к следующему виду функции неопределенности сложного пространственно-временного сигнала

$$\Psi(\eta;\tau) = \Psi(\eta)\Psi(\tau) = \sin c^2 2\pi F_{np}\eta = \sin c^2 2\pi F_M \tau. \qquad (17)$$

Как следует из (17) сложный пространственно- временной сигнал имеет функцию неопределенности значительно отличающуюся от функции неопределенности обычно используемых простых пространственно временных сигналов, имеющих функцию неопределенности типа $\sin c\, x$ [6]. Отличие как по ширине главного лепестка, так и по уровню боковых Так как вид функции неопределенности описывает выходной эффект оптимальной системы обработки, то использование в измерительных радиосистемах сложных пространственно-временных сигналов открывает дополнительные возможности для улучшения качественных показателей измерительных систем. Это обусловлено тем фактом, что при формировании сложных зондирующих сигналов осуществляется их предварительная модуляция, которая приводит к тому, что в каждом направлении сектора обзора излучается сигнал вполне определенной (известной) формы, что позволяет учесть это при обработке таких сигналов и соответственно улучшить качественные характеристики системы обработки по сравнению со случаем использования простых сигналов [4].

Учитывая, что основные качественные показатели измерительной системы – разрешающая способность, точность и однозначность отсчета параметров определяются видом функции неопределенности, определим, насколько они улучшаются при использовании сложных пространственно-временных сигналов, функция неопределенности которых описывается выражением (17).

Разрешающая способность системы определяется областью высокой корреляции функции неопределенности [5]

$$\lambda_{кор} = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left|\Psi(\lambda)\right|^2 d\lambda. \qquad (18)$$

Для обычно используемых простых пространственно-временных сигналов, функция неопределенности которых описывается функцией типа $\sin\mathrm{c}\, x$ [4,5], область высокой корреляции $\lambda_{кор.пс}$ составляет

$$\lambda_{кор.пс} = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left|\sin\mathrm{c}\; 2\pi\chi_M\theta\right|^2 d\theta = \frac{1}{2\chi_M}. \qquad (19)$$

Для сложных пространственно-временных сигналов, функция неопределенности которых задана выражением (17), область высокой корреляции $\lambda_{кор.сс}$ составляет

$$\lambda_{кор.сс} = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left|\sin\mathrm{c}\; 2\pi\chi_M\theta\right|^2 d\theta = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{2\chi_M}\right). \qquad (20)$$

Точность оценки параметров сигнала так же определяется видом функции неопределенности [6]

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{1}{\left.\dfrac{\partial^2}{\partial\lambda^2}\Psi(\lambda)\right|_{\lambda=0}}. \qquad (21)$$

Определяя отношение вторых производных от функции неопределенности сложных сигналов $\Psi_{сс}(\lambda)$ и простых – $\Psi_{пс}(\lambda)$ получаем

$$\frac{\sigma^2_{\lambda_{сс}}}{\sigma^2_{\lambda_{пс}}} = 2\;\; . \qquad (22)$$

Как следует из (19...22) измерительные системы со сложными пространственно-временными сигналами обладают более высокими потенциальными возможностями по сравнению с обычно используемыми системами с простыми сигналами, они характеризуются лучшей разрешающей способностью (20) и точностью измерений (22). Для того, чтобы реализовать такое значение разрешающей способности (20) измерительными системами с простыми сигналами они должны при прочих разных условиях использовать антенны, как минимум, на одну треть больших размеров, чем для систем со сложными сигналами, а чтобы реализовать такое же значение точности измерений (22) системы с простыми сигналами должны иметь примерно в 1,5 раза большие антенны, либо использовать радиолинии с существенно большим энергетическим потенциалом [7].

Выводы. Усложнение структуры пространственно-временных сигналов, расширение спектров их пространственных частот на заданных интервалах их пространственного существования приводит по сравнению с традиционно используемыми в практике траекторных измерений простыми пространственно-временными сигналами к существенному увеличению их пространственной базы и является предпосылкой их сжатия и реализации высокой точности измерений, пропускной и разрешающей способности.

Если же для повышения точности измерений и разрешающей способности использовать широкополосные простые пространственно-временные сигналы, то они не обеспечат требуемого значения пропускной способности (последовательный обзор пространства). И помимо этого, при равной ширине спектров пространственных частот простых и сложных сигналов функция неопределенности простых сигналов описывается функцией типа $\operatorname{sinc} x$, а сложных – $\operatorname{sinc}^2 x$, что открывает дополнительные возможности совершенствования измерительных радиосистем с шумоподобными пространственно-временными сигналами.

1. *Явтушенко А.М.* Застосування космічних систем в сучасних умовах / *А.М. Явтушенко*. – К.: НАОУ,2004. – 347с.

2. Информационно-измерительные системы с шумоподобными сигналами /*Под ред. Э.Н. Хомякова*. МО СССР, 1983.-180с.

3. *Оптические* системы поиска с пространственно-временными зондирующими сигналами / *Баранов В.М., Купченко Л.Ф. и др.* В кн.: Пространственно-временная обработка сигналов. - Харьков: ХАИ, 1986, -с.48-52.

4. *Фалькович С.Е.* Оценка параметров сигнала. -М.: Сов. радио, 1970. -336с.

5. *Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н.* Статистическая теория измерительных радиосистем. -М.: Радио и связь, 1981. -288с.

Поступила 18.08.2010р.