

Точность оценки местоположения источников последовательностей сверхширокополосных импульсов в дальномерных системах

С.Н. Разиньков

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Российская Федерация, г. Воронеж
ул. Старых Большевиков, 54а

С использованием частотно-угловых характеристик плоских апертурных антенн при передаче-приеме негармонических сигналов найдена дисперсия оценки координат излучателей последовательностей сверхширокополосных импульсов в дальномерных системах местоопределения.

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, дальномерная система местоопределения, дисперсия оценки координат излучателя.

Оценка координат мобильных объектов при дистанционном контроле и управлении движением [1] осуществляется по результатам обработки сигналов бортовых ответчиков на запросы радиолокационных постов наблюдения (РПН). Для обзора пространства в широких секторах углов РПН оснащаются слабонаправленными антеннами [1; 2]; помехоустойчивость управления достигается за счет применения запросных и ответных сигналов в виде последовательностей сверхширокополосных импульсов [3].

Местоопределение СШП-источников радиоизлучения (ИРИ) в РПН осуществляется дальномерным методом; положение объекта характеризуется координатами точки пересечения лучей, построенных из позиций не менее чем двух разнесенных в пространстве приемников-измерителей времени прихода сигналов [2].

Как показано в [4], дисперсия оценки максимального правдоподобия времени прихода СШП-сигнала [2; 3] обратно пропорциональна значению интеграла от произведения спектральной плотности излучаемой энергии и парциальных коэффициентов направленного действия (КНД) передающих и приемных антенн в эквивалентной полосе рабочих частот приемника [5]. При этом форма обрабатываемых импульсов, зависящая от направления на их источник, типа и электрических размеров антенн РПН [6], в общем случае является различной на входе каждого измерителя [4].

В предлагаемой работе с использованием частотно-угловых характеристик передачи-приема

негармонических сигналов [5; 6] найдена дисперсия оценки местоположения источников регулярных последовательностей СШП-импульсов в дальномерных системах с плоскими апертурными антеннами при нормативных ограничениях на уровень излучаемой мощности [1; 7].

Цель работы – исследование точности местоопределения объекта с учетом направленных свойств его антенны и антенн приемников-измерителей времени прихода сигналов.

Для позиционирования приемников РПН введем декартову систему координат XOY ; для оценки местоположения ИРИ – полярную систему координат (ρ, θ) , начало которой совпадает с точкой O .

Будем полагать, что приемники-измерители времени прихода сигналов располагаются на оси Ox в точках $x_k = (-1)^k L/2$, ($k = 1, 2$), где L – база измерительной системы [2]. Положение излучателя характеризуется радиус-вектором с абсолютной величиной $|\rho| = R_0$, отклоненным от оси Oy по часовой стрелке на угол $\theta = \theta_0$.

Собственные шумы приемников представимы гауссовским белым шумом с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 ; передаточные функции входных усилительных каскадов являются постоянными в полосе рабочих циклических частот $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$. Антенны ИРИ и измерительных приемников имеют плоские апертуры в форме кругов с радиусами a_T и a_R соответственно, удовлетворяющими условию $\max(a_T, a_R) \ll L$. В качестве частотно-угловых

характеристик передачи-приема СШП-сигналов по аналогии с [4–7] будем использовать парциальные КНД этих антенн $G_T(\omega, \theta)$ и $G_R(\omega, \theta)$.

Излучаемая СШП-последовательность характеризуется числом N_s , периодом следования T_s и средней мощностью \bar{P}_s импульсов. Для однозначного определения координат объекта [1] и накопления принимаемой энергии по линейному закону [3] величина T_s значительно превышает время автокорреляции импульсов [4; 7].

При $R_0 \gg L$ дисперсия местоопределения излучателя в дальномерной системе имеет вид [2]

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{c R_0}{L \cos \theta_0} \right)^2 \sum_{k=1}^2 \sigma_{tk}^2, \quad (1)$$

где σ_{tk}^2 – дисперсия измерения времени прихода сигнала в k -м ($k = 1, 2$) приемнике; c – скорость света.

Согласно [4], при оценке времени прихода регулярной последовательности СШП-импульсов методом максимального правдоподобия [8] величина σ_{tk}^2 определяется выражением

$$\sigma_{tk}^2 = \frac{8\pi N_0}{N_s \bar{P}_s T_s} \left(\frac{R_0}{c} \right)^2 \frac{\xi_k^2(L, R_0, \theta_0)}{S_k(L, R_0, \theta_0)}, \quad (2)$$

$$k = 1, 2,$$

где

$$S_k(L, R_0, \theta_0) \equiv S_k(\theta_k) = \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \times \quad (3)$$

$$\times \int_{\Omega_{\min}^k(\theta_k)}^{\Omega_{\max}^k(\theta_k)} G_T(\omega, \theta_k) G_R(\omega, \theta_k) d\omega,$$

$$\xi_k(L, R_0, \theta_0) = \sqrt{1 + (-1)^k \frac{L}{R_0} \sin \theta_0 + \left(\frac{L}{2R_0} \right)^2} \quad (4)$$

– геометрический фактор, характеризующий взаимное расположение источника и k -го ($k = 1, 2$) приемника сигналов,

$$\theta_k = \arctg \left(\frac{R_0 \cos \theta_0}{R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k-1} L/2} \right)$$

– направление на излучатель из позиции k -го ($k = 1, 2$) измерителя, $\Omega_{\min}^k(\theta_k)$ и $\Omega_{\max}^k(\theta_k)$ – нижняя и верхняя границы эквивалентной полосы циклических частот обрабатываемого сигнала, удовлетворяющие уравнениям [6]:

$$\Omega_{\max}^k(\theta_k) - \Omega_{\min}^k(\theta_k) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_T(\omega, \theta_k) G_R(\omega, \theta_k) d\omega = \frac{1}{\max_{\omega} [G_T(\omega, \theta_k) G_R(\omega, \theta_k)]}, \quad (5)$$

$$\min_{\theta_k} \Omega_{\min}^k(\theta_k) = \omega_{\min},$$

$$\max_{\theta_k} \Omega_{\max}^k(\theta_k) = \omega_{\max}. \quad (6)$$

Из (1)–(4) с учетом (5), (6) находим дисперсию местоопределения излучателя последовательности СШП-импульсов:

$$\sigma_R^2 = \frac{8\pi N_0}{N_s \bar{P}_s T_s} \left(\frac{R_0^2}{L \cos \theta_0} \right)^2 \sum_{k=1}^2 \frac{\xi_k^2(L, R_0, \theta_0)}{S_k(L, R_0, \theta_0)}. \quad (7)$$

Согласно (7), при максимально допустимом нормативными ограничениями уровне излучаемой мощности точность оценки координат СШП-излучателя возрастает пропорционально значению интеграла от произведения парциальных КНД передающей и приемных антенн в эквивалентной полосе рабочих частот приемника. Среднеквадратическая ошибка (СКО) местоопределения σ_R источника последовательностей СШП-импульсов с периодом следования, значительно превышающим время их автокорреляции, снижается по сравнению с показателем, достижимым при обработке одиночного сигнала, в $\sqrt{N_s}$ раз [3].

Для достижения высокой точности оценки времени прихода и координат источников СШП-сигналов требуется применять антенны с равномерным распределением КНД в эквивалентной полосе циклических рабочих частот $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$. При местоопределении излучателя импульсов с высокой крутизной огибающей и малой шириной спектра могут быть использованы узкополосные антенны с высокими КНД $G_R(\omega, \theta_k)$ в области максимума $G_T(\omega, \theta_k)$, $k = 1, 2$.

Парциальный КНД плоской апертурной антенны с нормированным радиусом раскрытия $\omega_{\min} a_{T,R}/c \geq 5$ в приближении физической оптики имеет вид [5]

$$G_{T,R}(\omega, \theta_k) = v_{T,R}(\omega) \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\theta_k}{2} \right) \times \quad (8)$$

$$\times J_1^2 \left(\frac{\omega a_{T,R}}{c} \sin \theta_k \right), \quad k = 1, 2,$$

где $v_{T,R}(\omega)$ – парциальный коэффициент использования поверхности антенны, который при $R_0 \gg \max(a_T, a_R)$ определяется выражением [7]

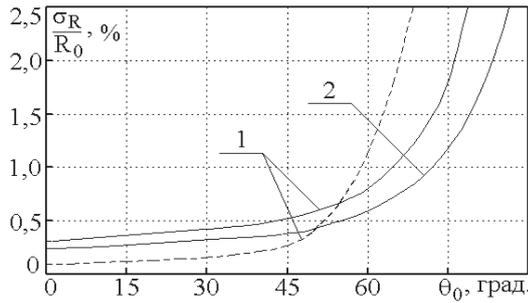


Рис. Зависимости нормированной СКО местоопределения излучателя СШП-импульсов от его углового положения

$$\nu_{T,R}(\omega) \approx \text{sinc}^2\left(\frac{\omega a_{T,R}^2}{2cR_0}\right), \quad (9)$$

$J_1(\dots)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка.

В результате подстановки (8) с учетом (9) в (3), а полученного результата с учетом (4)–(6) последовательно в (2) и (1) получим

$$\begin{aligned} \sigma_R^2 = & \frac{8\pi N_0 (\omega_{\max} - \omega_{\min})}{N_s \bar{P}_s T_s} \left(\frac{R_0^2}{L \cos \theta_0}\right)^2 \times \\ & \times \sum_{k=1}^2 \xi_k^2(L, R_0, \theta_0) \text{tg}^4\left(\frac{\theta_k}{2}\right) \times \\ & \left[\int_{\Omega_{\min}^k(\theta_k)}^{\Omega_{\max}^k(\theta_k)} J_1^2\left(\frac{\omega a_T}{c} \sin \theta_k\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\omega a_T^2}{2cR_0}\right) \times \right. \\ & \left. \times \text{sinc}^2\left(\frac{\omega a_R^2}{2cR_0}\right) J_1^2\left(\frac{\omega a_R}{c} \sin \theta_k\right) d\omega \right]^{-1}. \quad (10) \end{aligned}$$

На рисунке приведены найденные с использованием (10) зависимости нормированной СКО местоопределения ИРИ σ_R/R_0 от его углового положения θ_0 при $\omega_{\min} a_T / c = 5$, $R_0 / L = 10$, $L / (cT_s) = 0,2$ и $\bar{P}_s T_s / N_0 = 90$ дБ. Сплошными линиями представлены результаты, полученные для приемных антенн с нормированными радиусами раскрытов $\omega_{\min} a_R / c = 5$, штриховой линией — для антенн с $\omega_{\min} a_R / c = 10$; зависимости 1 рассчитаны при $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 4$, зависимость 2 — при $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 6$.

Из их анализа следует, что СКО местоопределения объекта убывает по мере уменьшения угла θ_0 вследствие увеличения доли энергии сигнала, перехватываемой по главному лучу энергетической диаграммы направленности [5] передающей антенны. Увеличение радиусов раскрытов приемных антенн также приводит к повышению точности выполняемых измерений по линейному закону за счет возрастания парциальных КНД.

При передаче-приеме сигналов электрически малыми антеннами, а также при перехвате излучений по главному лучу энергетической диаграммы направленности антенны, когда

$$J_1\left(\frac{\omega a_{T,R}}{c} \sin \theta\right) \approx \frac{\omega a_{T,R}}{2c} \sin \theta,$$

выражение (8) преобразуется к виду [5]

$$G_{T,R}(\omega, \theta_k) \approx \left(\frac{\omega a_{T,R}}{c}\right)^2 \cos^4\left(\frac{\theta_k}{2}\right), \quad (11)$$

$k = 1, 2$.

Подставляя (11) в (3), а полученный результат последовательно в (2) и (1), при $\omega_{\max} / \omega_{\min} \gg 1$ находим

$$\begin{aligned} \sigma_R^2 = & \frac{80\pi N_0}{N_s \bar{P}_s T_s (a_T a_R L \cos \theta_0)^2} \times \\ & \times \left(\frac{cR_0}{\omega_{\max}}\right)^4 \sum_{k=1}^2 \frac{\xi_k^2(L, R_0, \theta_0)}{\cos^4\left(\frac{\theta_k}{2}\right)}. \quad (12) \end{aligned}$$

Из (12) следует, что при неизменных габаритах антенных систем точность местоопределения СШП ИРИ может быть повышена за счет применения сигналов с большим значением верхней границы полосы циклических частот, в частности высокочастотных радиоимпульсов [3; 5] с малой относительно a_T и a_R пространственной длительностью.

Таким образом, с использованием частотно-угловых характеристик плоских апертурных антенн при передаче-приеме негармонических сигналов исследована точность местоопределения излучателей последовательностей СШП-импульсов по измерениям времени их прихода в пространственно разнесенных точках. Оценены возможности ее повышения за счет выбора электрических размеров антенн и параметров сигналов.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
3. Разиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
4. Разинов С.Н., Богословский А.В. Исследование точности оценки угловых координат источников сверхширокополосных сигналов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 2. С. 22–30.

-
5. Авдеев В.Б. Энергетические характеристики направленности антенн и антенных систем при излучении и приеме сверхширокополосных сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2002. № 7 (62). С. 5–27.
 6. Разиньков С.Н. Спектральные энергетические уравнения передачи негармонических сигналов и их применение в сверхширокополосных радиосистемах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 12–17.
 7. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн / под ред. В.Б. Авдеева, А.В. Ашихмина. Воронеж: Изд-во Воронежского госуниверситета, 2005. 223 с.
 8. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных систем. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
-

Accuracy of assessment of location of sources of sequences super-broadband impulses by measuring systems

S.N. Razin'kov

With use of frequency and angular characteristics of flat aperture antennas by transfer reception of non-harmonic signals dispersion of an assessment of coordinates of radiators of sequences of super-broadband impulses is found in measuring systems of a fixing.

Keywords: super-broadband signal, location measuring system, dispersion of assessment of coordinates of radiator.
