

Точность местоопределения излучателей последовательностей сверхширокополосных импульсов в триангуляционных 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 спектрального энергетического уравнения прямого радиоканала для расчета энергии негармонических сигналов на входах пространственно разнесенных приемников вычислены среднеквадратические ошибки местоопределения источников регулярных последовательностей сверхширокополосных импульсов в триангуляционных системах с учетом направленных свойств передающих и приемных антенн. Угловые координаты излучателей оценивались путем синхронного измерения времени прихода сигналов в различных точках пространства.

Исследованы среднеквадратические ошибки оценки местоположения объектов, для излучения и перехвата сигналов которых применяются апертурные антенны и линейные антенные решетки. Проведен анализ зависимостей погрешности определения координат излучателей от ширины полосы рабочих циклических частот и электрических размеров антенных систем.

Ключевые слова: сверхширокополосный импульс, приемник-измеритель времени прихода сигнала, триангуляционная система местоопределения источников радиоизлучения, парциальный коэффициент усиления антенны.

При определении местоположения сверхширокополосных (СШП) источников радиоизлучения триангуляционным способом [1] оценка их угловых координат осуществляется по разности времени прихода сигналов (ВПС) в пространственно разнесенных точках [2]. Базовый комплект угломерной системы [1] включает в себя два пеленгаторных поста и пункт сбора и обработки пеленговой информации, связанные линиями передачи данных [1]. Каждый пост выполняется в виде двухпозиционной подсистемы синхронизированных приемников-измерителей ВПС с пунктом сбора и обработки результатов измерений [2]. Местоположение объекта характеризуется координатами точки пересечения лучей, построенных из центров пеленгационных баз [2].

В [2] в приближении равенства дисперсий оценок максимального правдоподобия [3] и высокой апостериорной точности регистрации разности моментов ВПС в приемниках с гипотетическими диапазонными всенаправленными антеннами найдена среднеквадратическая ошибка (СКО) местоопределения СШП изотропных излучателей.

Однако ввиду технической сложности генерации мощных СШП-сигналов [4; 5] для их передачи-приема, как правило, применяются апертур-

ные антенны с высокими показателями направленности в диапазоне частот [6; 7] и антенные решетки, выполняющие синхронное сложение излучений отдельных элементов в пространстве [5; 8].

Согласно [6; 8], парциальные коэффициенты усиления (КУ) таких антенных систем в общем случае не могут быть представлены произведениями угловых и частотных распределений. Поэтому форма и частотно-временные параметры сигнала на входе приемника-измерителя зависят от направления на его источник, типа и электрических размеров передающей и приемной антенн [9; 10]. Дисперсия оценки ВПС, как показано в [9], обратно пропорциональна значению интеграла от произведения спектральной плотности энергии излучателя и парциальных КУ антенн в эквивалентной полосе циклических частот [6] перехватываемого волнового процесса; ее значения в каждой точке пространства различны [9; 10].

В предлагаемой работе с использованием спектрального энергетического уравнения прямого радиоканала [6] для расчета энергии негармонических сигналов на входах пространственно разнесенных приемников найдены СКО оценок координат источников регулярных последовательностей СШП-импульсов, для излучения и

перехвата которых применяются плоские апертурные антенны и линейные антенные решетки.

Цель работы – анализ влияния характеристик передающих и приемных антенных систем на точность оценки координат объектов.

Для задания позиций приемников-измерителей ВПС введем декартову систему координат XOY , а для определения местоположения источника радиоизлучения – полярную систему координат (ρ, θ) , начало которой совпадает с точкой O .

Будем полагать, что i -й приемник-измеритель ВПС ($i = 1, 2$), входящий в состав k -й пеленгационной подсистемы ($k = 1, 2$), размещается на оси Ox в точке $x_k^{(i)} = (-1)^k d/2 + (-1)^i L/2$, где d – база системы местоопределения, L – пеленгационная база ($L \ll d$); границы базы системы местоопределения совпадают с центральными точками $x_k = (-1)^k d/2$ пеленгационных подсистем ($k = 1, 2$). Положение излучателя задается 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 $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$. Парциальные КУ антенн излучателя и приемников обозначим $G_T(\omega, \theta)$ и $G_R(\omega, \theta)$ соответственно.

Излучаемая СШП-последовательность характеризуется средней мощностью \bar{P}_S , числом N_S и периодом следования T_S импульсов. Величина T_S значительно превышает время автокорреляции импульсов [6] и в процессе измерений является известной; спектр последовательности сосредоточен в полосе рабочих циклических частот приемников.

При $R_0 \gg L$, когда СКО измерения разности хода сигналов между точками приема значительно меньше базы системы местоопределения и подсистемы пеленгования, дисперсия триангуляционной оценки координат объекта имеет вид [1]

$$\sigma_r^2 = \frac{R_0^4}{d^2 \cos^2 \theta_0} \sum_{k=1}^2 \sigma_{\theta k}^2, \quad (1)$$

где

$$\sigma_{\theta k}^2 = \frac{c^2}{L^2 \cos^2 \theta_{0k}} \sum_{i=1}^2 \sigma_{tki}^2 \quad (2)$$

– дисперсия оценки направления прихода

$$\theta_{0k} = \begin{cases} \arctg \left(\frac{R_0 \cos \theta_0}{R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2} \right) \\ \text{при } R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2 \geq 0; \\ \pi - \arctg \left(\frac{R_0 \cos \theta_0}{R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2} \right) \\ \text{при } R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

сигнала относительно центра k -й пеленгационной базы ($k = 1, 2$), σ_{tki}^2 – дисперсия измерения ВПС i -м приемником ($i = 1, 2$) k -й пеленгационной подсистемы ($k = 1, 2$), c – скорость света.

Точность оценки максимального правдоподобия времени прихода регулярной последовательности импульсов с известным значением T_S определяется выражением [10]

$$\sigma_{tki}^2 = \frac{8 \pi N_0}{N_S \bar{P}_S T_S} \left(\frac{R_0}{c} \right)^2 \frac{\left[\xi_k^{(i)}(d, L, R_0, \theta_0) \right]^2}{S_k^{(i)}(d, L, R_0, \theta_0)}, \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \quad i = 1, 2,$$

где

$$\begin{aligned} \xi_k^{(i)}(d, L, R_0, \theta_0) &= \\ &= \sqrt{1 + \frac{(-1)^k d + (-1)^i L}{R_0} \sin \theta_0 +} \\ &+ \left(\frac{(-1)^k d + (-1)^i L}{2 R_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

– геометрический фактор, характеризующий взаимное расположение источника СШП-сигналов и приемников системы местоопределения,

$$\begin{aligned} S_k^{(i)}(d, L, R_0, \theta_0) &= \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \times \\ &\times \int_{\Omega_{\min}(\theta_k^{(i)})}^{\Omega_{\max}(\theta_k^{(i)})} G_T(\omega, \theta_k^{(i)}) G_R(\omega, \theta_k^{(i)}) d\omega, \end{aligned} \quad (6)$$

– эффективный момент передачи СШП-сигнала в прямом радиоканале [6] от излучателя к i -му приемнику ($i = 1, 2$) k -й пеленгационной подсистемы ($k = 1, 2$), усредненный в полосе циклических частот $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$,

$$\theta_{0k}^{(i)} = \begin{cases} \arctg(R_0 \cos \theta_0 / [R_0 \sin \theta_0 + \\ + (-1)^{k+1} d/2 + (-1)^{i+1} L/2]) \\ \text{при } R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2 + \\ + (-1)^{i+1} L/2 \geq 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi - \arctg(R_0 \cos \theta_0 / [R_0 \sin \theta_0 + \\ + (-1)^{k+1} d/2 + (-1)^{i+1} L/2]) \\ \text{при } R_0 \sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2 + \\ + (-1)^{i+1} L/2 < 0 \end{array} \right.$$

– направление на излучатель из позиции с координатами $(x_k^{(i)}; 0)$, $\Omega_{\min}(\theta_k^{(i)})$ и $\Omega_{\max}(\theta_k^{(i)})$ – нижняя и верхняя границы эквивалентной полосы циклических частот радиоканала передачи сигналов к i -му приемнику ($i = 1, 2$) k -й пеленгационной подсистемы ($k = 1, 2$), удовлетворяющие уравнению [10]

$$\begin{aligned} \Omega_{\max}(\theta_k^{(i)}) - \Omega_{\min}(\theta_k^{(i)}) &= \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} G_T(\omega, \theta_k^{(i)}) G_R(\omega, \theta_k^{(i)}) d\omega}{\max_{\omega} [G_T(\omega, \theta_k^{(i)}) G_R(\omega, \theta_k^{(i)})]} \end{aligned} \quad (8)$$

и условиям [9]:

$$\begin{aligned} \min_{\theta_k^{(i)}} \Omega_{\min}(\theta_k^{(i)}) &\geq \omega_{\min}, \\ \max_{\theta_k^{(i)}} \Omega_{\max}(\theta_k^{(i)}) &\leq \omega_{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

Из (4)–(6) следует, что дисперсия оценки времени прихода регулярной последовательности СШП-импульсов снижается пропорционально увеличению значения интеграла от произведения парциальных КУ антенн излучателя и приемника в пределах эквивалентной полосы циклических частот радиоканала. При совпадении диапазонов рабочих циклических частот излучателя и приемника эффективный момент передачи сигналов в радиоканале, согласно (6)–(9), равен произведению парциальных КУ их антенн, усредненному в полосе циклических частот $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$.

В соответствии с (6) имеем, что при большом периоде следования, позволяющем осуществлять линейное накопление импульсов в приемнике [9; 10], СКО оценки времени прихода последовательности снижается пропорционально $\sqrt{N_S}$, как при приеме узкополосных сигналов [11], вне зависимости от углового положения излучателя и парциальных КУ антенн.

Из (1)–(8) с учетом (9) находим дисперсию оценки координат источника регулярной последовательности СШП-импульсов

$$\sigma_r^2 = \frac{8\pi N_0}{N_S \bar{P}_S T_S} \left(\frac{R_0^3}{L d \cos \theta_0} \right)^2 \times$$

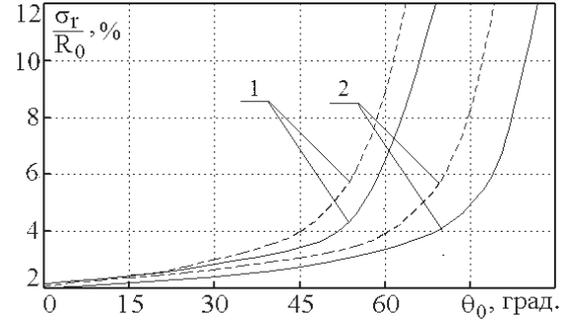


Рис. 1. Зависимости СКО пеленгования источника последовательности СШП-импульсов при использовании для их излучения и приема апертурных антенн

$$\begin{aligned} &\times \sum_{k=1}^2 \left[1 + \left(\frac{\cos \theta_0}{\sin \theta_0 + (-1)^{k+1} d/2R_0} \right)^2 \right] \times \\ &\times \sum_{i=1}^2 \left[S_k^{(i)}(d, L, R_0, \theta_0) \right]^{-1} \times \\ &\times \left[1 + \frac{(-1)^k d + (-1)^i L}{R_0} \sin \theta_0 + \right. \\ &\left. + \left(\frac{(-1)^k d + (-1)^i L}{2R_0} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

На основе (10) с учетом (6) проведен анализ точности местоопределения источников последовательностей СШП-импульсов, излучаемых и перехватываемых плоскими апертурными антеннами и линейными антенными решетками.

Парциальный КУ плоской апертурной антенны с радиусом раскрытия $a_{T,R}$, удовлетворяющим условию $\omega_{\min} a_{T,R} / c \geq 5$, при котором ее коэффициент полезного действия значителен [12], определяется выражением [6]

$$\begin{aligned} G_{T,R}(\omega, \theta) &= \text{sinc}^2 \left(\frac{\omega a_{T,R}^2}{2c R_0} \right) \times \\ &\times \text{ctg}^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) J_1^2 \left(\frac{\omega a_{T,R} \sin \theta}{c} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где $J_1(\dots)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка, $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$.

Путем подстановки (11) в (6) и (8), а полученных результатов в (10) с учетом (7) найдем дисперсию оценки координат СШП-излучателя при использовании для передачи и перехвата сигналов плоских апертурных антенн. Итоговое выражение не приводится ввиду громоздкости.

На рис. 1 представлены зависимости СКО оценки координат от углового положения источника СШП излучения, рассчитанные при $\omega_{\min} a_R / c = 5$ (пунктирная линия) и $\omega_{\min} a_R / c = 10$ (сплошная ли-

ния), $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 4$ (кривая 1) и $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 6$ (кривая 2), а также $\bar{P}_S T_S / N_0 = 90$ дБ, $\omega_{\min} a_{T,R} / c = 5$, $L / (c N_S T_S) = 0,2$, $d / L = 5$, $R_0 / d = 10$.

Из анализа приведенных результатов 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; 6] передающей антенны. Увеличение радиусов раскрытов приемных антенн также приводит к повышению точности выполняемых измерений по закону, близкому к линейному, за счет возрастания парциальных КУ.

При одинаковых габаритах антенных систем меньшая СКО оценки координат достигается для источников радиоизлучения с большим значением верхней границы полосы циклических частот, а при $\omega_{\min} a_{T,R} / c \geq 5$ и фиксированном отношении $\omega_{\max} / \omega_{\min}$ – для излучателей с большим значением ω_{\min} , поскольку высокочастотные компоненты спектров сигналов характеризуются меньшими потерями энергии при распространении в радиоканале [6; 7].

Парциальный КУ линейной решетки из $N_{T,R}$ элементарных электрических диполей с шагом $d_{T,R}$ имеет вид [6]

$$G_{T,R}(\omega, \theta) = 2 \sin^2 \theta \frac{F_{T,R}(\omega, \theta)}{\Phi_{T,R}(\omega)}, \quad (12)$$

где

$$F_{T,R}(\omega, \theta) = \frac{\sin^2 \left[\frac{\omega N_{T,R} d_{T,R}}{2c} \cos \theta \right]}{\sin^2 \left[\frac{\omega d_{T,R}}{2c} \cos \theta \right]},$$

$$\Phi_{T,R}(\omega) = \int_0^\pi F_{T,R}(\omega, \theta) \sin^3 \theta d\theta.$$

В результате подстановки (12) в (6) и (8), а полученных соотношений в (10) с учетом (7) определена точность оценки местоположения СШП-источников радиоизлучения при использовании в них и приемниках-измерителях ВПС указанных антенных решеток.

На рис. 2 представлены зависимости СКО местоопределения объекта от направления прихода импульсов при $\omega_{\min} d_{T,R} / c = 2$, $N_{T,R} = 5$, $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 4$ (кривая 1) и $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 6$ (кривая 2). Отношения излучаемой энергии к односторонней спектральной плотности мощности собственных шумов приемников-измерителей ВПС, размеров пеленгационных баз к пространственной

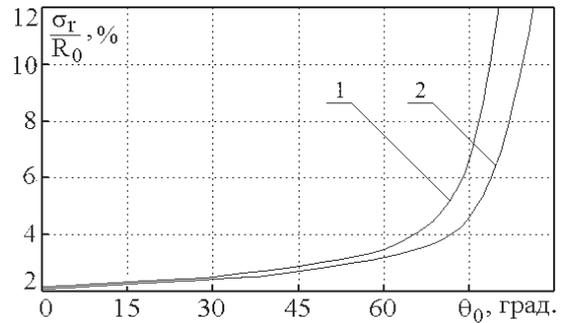


Рис. 2. Зависимости СКО пеленгования источника последовательности СШП-импульсов при использовании для их излучения и приема линейных антенных решеток

длине последовательности, а также характеристики взаимного расположения объекта и постов системы местоопределения выбраны такими же, как при получении зависимостей на рис. 1.

Из представленных результатов следует, что при увеличении ω_{\max} в 1,5 раз СКО оценки координат СШП-излучателя в секторе углов $\theta_0 \in [30^\circ; 60^\circ]$ снижается в 1,2...1,6 раз.

Уменьшение точности выполняемых измерений наблюдается при углах, удовлетворяющих условию

$$\frac{\omega N_{T,R} d_{T,R}}{2c} \cos \theta_k^{(i)} \ll 1,$$

вследствие малой доли излучаемой энергии и низкой эффективности ее перехвата решетками приемников-измерителей. Малая точность местоопределения объектов также характерна для угломерных систем, оснащенных решетками с малым числом и высокой плотностью размещения элементов, когда

$$\frac{\omega N_R d_R}{2c} \ll 1$$

и максимальное значение КУ, как показано в [9], стремится к 1,5.

Установлено, что при увеличении числа элементов решеток приемников-измерителей ВПС до $N_R = 10$ или шага до $\omega_{\min} d_R / c = 3,2$ погрешность местоопределения излучателя с коэффициентом перекрытия полосы рабочих циклических частот $\omega_{\max} / \omega_{\min} = 4$ в секторе углов $\theta_0 \in [30^\circ; 60^\circ]$ снижается в 1,3 раз.

Таким образом, с использованием спектрального энергетического уравнения прямого радиоканала для расчета энергии негармонических сигналов на входах пространственно разнесенных приемников вычислены СКО оценок максимального правдоподобия координат источников регулярных последовательностей СШП-импуль-

сов в триангуляционных системах с учетом направленных свойств передающих и приемных антенн. Проведен анализ точности местопределения излучателей при применении в них и измерительных приемниках плоских апертурных антенн и линейных антенных решеток с различными электрическими размерами и полосами рабочих циклических частот.

Список литературы

1. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
2. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
3. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных систем. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
4. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / А.М. Бобрешов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 103–108.
5. Курочкин А.П., Лось В.Ф., Стрижков В.А. Формирование энергетических диаграмм направленности видеоимпульсными сканирующими антенными решетками // Антенны. 2007. № 1 (116). С. 45–54.
6. 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.
7. Авдеев В.Б. Энергетические характеристики передачи-приема сверхширокополосных сигналов в радиоканалах с апертурными антеннами // Антенны. 2001. № 5(48). С. 5–9.
8. Проблемы антенной техники / под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1989. 368 с.
9. Разиньков 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.
10. Разиньков С.Н. Точность оценки местоположения источников последовательностей сверхширокополосных импульсов в дальномерных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 2. С. 53–56.
11. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 296 с.
12. Кюн Р. Микроволновые антенны / пер. с нем. В.И. Тарабрина, Э.В. Лабецкого; под ред. М.П. Долуханова. М.: Судостроение, 1967. 517 с.

Accuracy of a fixing of radiators of sequences super-broadband impulses in triangulation systems

S.N. Razin'kov

With use of the spectral power equation of a direct radio channel for calculation of energy of non-harmonic signals on entrances of spaced receivers mean square errors of a fixing of sources of regular sequences of super-broadband impulses in triangulation systems taking into account the directed properties of the transferring and reception antennas are calculated. Angular coordinates of radiators were estimated by synchronous measurement of time of arrival of signals in various points of space.

Mean square errors of an assessment of location of objects, for the radiation and which interception of signals aperture antennas and linear antenna arrays are used are investigated. The analysis of dependences of an error of determination of coordinates of radiators on width of a strip of working cyclic frequencies and the electric sizes of antenna systems is carried out.

Keywords: super-broadband impulse, receiver measuring instrument of time of arrival of a signal, triangulation system of a fixing of sources of a radio emission, part coefficient of strengthening of the antenna.