

УДК 621.396.96

Ф.Н. Ковалев

ПРОСВЕТНЫЕ МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются принципы построения просветных многобазовых радиолокационных комплексов с измерениями доплеровской частоты. Приведены классификация многопозиционных РЛС и методика оценки потенциальной точности.

Ключевые слова: просветная многопозиционная радиолокация, просветная многобазовая РЛС, доплеровская частота, точность оценки координат.

Введение

В просветных радиолокаторах обнаружение цели осуществляется при её расположении между приемной и передающей антеннами (рис. 1). Благодаря такой геометрии системы происходит резкое увеличение бистатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) лоцируемых объектов, практически не зависящее от применения противорадиолокационных покрытий [1, 2].

Повышенный интерес у исследователей и конструкторов вызывают бистатические просветные радары с монохроматическим излучением [1, 3, 4]. В них рассеянный целью сигнал поступает на вход приемника совместно с мощным прямым сигналом передатчика. Получаемый в точке приема интерференционный сигнал вследствие движения цели становится модулированным по амплитуде с доплеровской частотой, так что для выделения сигнала доплеровской частоты можно использовать амплитудный детектор. К достоинствам такого приемника следует отнести его простоту и отсутствие специальной привязки по высокой частоте с передатчиком, что особенно важно при большом разнесении приемника и передатчика. Координаты цели определяются по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала.

На рис. 1 изображена схема расположения элементов бистатической системы на плоскости. Приемная антенна (Пр) имеет координаты $(0, 0)$, передающая (П) – $(d, 0)$. Отрезок между приемной и передающей антеннами называется базой, его длина – d . Обнаружение цели происходит в окрестности базы, когда имеет место заметный рост ЭПР [1, 4]. Условно зону действия можно ограничить некоторым минимальным значением бистатического угла $|\beta| = |\beta_{\min}|$.

Для определенности систему на рис. 1 будем называть однобазовой радиолокационной системой (РЛС). С учетом введенных обозначений выражения для доплеровского сдвига частоты и угла прихода сигнала имеют вид

$$f = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl}{dt}, \quad (1)$$

$$\alpha = \arctg(y/x), \quad (2)$$

λ – рабочая длина волны; t – время; $l = r_{\text{п}} + r_{\text{пр}}$ – суммарная дальность, $r_{\text{п}} = \sqrt{(d-x)^2 + y^2}$, $r_{\text{пр}} = \sqrt{x^2 + y^2}$.

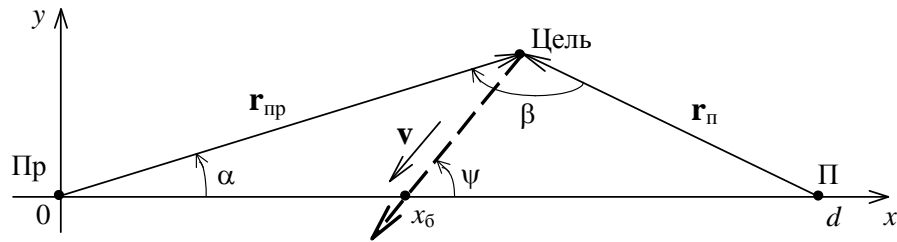


Рис. 1. Геометрия бистатического радиолокатора:

$r_{\text{п}}$ и $r_{\text{пр}}$ – дальности от антенн до цели; α – пеленг цели; β – угол между направлениями от цели на передающую и приемную антенны (бистатический угол); v – скорость цели

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития просветной радиолокации является переход от бистатических к многопозиционным системам, состоящим из нескольких однобазовых РЛС, в которых совместно осуществляется радиолокационное наблюдение целей. Однобазовые РЛС в этом случае удобно называть бистатическими ячейками. И поскольку просветная многопозиционная радиолокация находится на начальном этапе исследований, то для их упорядоченности целесообразно наметить основные принципы работы и перспективные способы построения таких систем, что и сделано в данной статье.

Виды просветных многопозиционных РЛС

К многопозиционным радиолокационным системам (МПРЛС) относят системы с несколькими разнесенными в пространстве передающими и приемными позициями, в которых производится совместная обработка получаемой информации о целях [5]. Существует большое число различных типов МПРЛС, различающихся назначением, составом и основными характеристиками. Для удобства анализа МПРЛС их классифицируют по ряду характерных признаков. Например, в [5, 6] МПРЛС разделяют: по степени когерентности и уровню объединения информации; по степени автономности приема сигналов; по месту расположения позиций и т.д. Не вдаваясь в детали этой классификации, отметим, что определение МПРЛС и указанные признаки можно в полной мере отнести и к просветным радиолокационным устройствам. Однако последние имеют некоторые особенности, что необходимо учитывать при анализе их работы.

Просветная радиолокация предопределяет расположение в разных точках пространства передатчика и приемника – цель должна находиться между ними – и тем самым минимальное количество позиций. По принятой в радиолокации терминологии просветная система с одним передатчиком и одним приемником – однобазовая РЛС (рис. 1) – является бистатической РЛС [5,6]. Все просветные системы с большим количеством позиций можно условно разделить на два класса:

1) системы с одним передатчиком и несколькими приемниками – их часто называют РЛС с разнесенным приемом [5]. Они реализуются наиболее просто, так как бистатические ячейки, образованные передатчиком и каждым из приемников, работают с одним и тем же зондирующим сигналом;

2) системы с несколькими передатчиками и одним и более приемниками – заметно сложнее в организации, поскольку ячейки, образованные разными передатчиками, должны работать в различных частотных диапазонах или поочередно во времени. Это предотвращает проникновение рассеянных и излученных сигналов одной системы в приемники других РЛС.

В случае частотного разнесения, селекция каналов в приемниках осуществляется высокоизбирательными фильтрами. Разница частот передатчиков и полосы пропускания приемных фильтров каналов определяется диапазоном доплеровских смещений, или, проще говоря, максимальным смещением f_{max} . Согласно (1), оно соответствует наиболее скоростным

целям $v = v_{\max}$, находящимся в окрестности границы зоны действия (т.е. $|\beta| = |\beta_{\min}|$) и двигающимся по биссектрисе угла β (рис. 1) в направлении базы:

$$f_{\max} = \frac{2v_{\max}}{\lambda} \cos(\beta_{\min}/2).$$

Если пользоваться временным разделением сигналов, то в системе организуются поочередное излучение передатчиков и временные окна для работы бистатических радаров. Основой временной селекции являются относительно узкая ширина зоны действия и небольшое время задержки рассеянного сигнала относительно прямого.

Потенциально каждая пара передатчика и приемника может образовывать бистатическую ячейку. Для этого должен использоваться кооперированный прием [5]: все приемники РЛС рассчитаны на прием сигналов от целей, облученных любым передатчиком.

На практике переход к нескольким передатчикам может быть оправдан простотой и удобством их возможного размещения, необходимости повышения помехозащищенности системы, соображениями по увеличению зоны местоопределения, а также желанием создания РЛС с измерениями пеленга относительно передающей системы.

Расстояние между приемниками (передатчиками) определяет степень пространственной когерентности рассеянных объектами сигналов в пунктах приема. Например, относительно небольшие расстояния – не более нескольких длин волн – между приемниками РЛС с разнесенным приемом позволяют рассматривать приемную систему МПРЛС как единую антенную решетку (или разреженную решетку), способную измерять фазовые сдвиги сигналов. Точно также небольшое разнесение передающих антенн и измерение в приемнике разности фаз сигналов, рассеянных на объекте, дает возможность оценивать угловое положение объекта относительно системы передатчиков.

Существенным признаком классификации просветных МПРЛС является набор первичных параметров, используемых для последующей оценки координат и траектории цели. Так, в “традиционных” просветных РЛС с выделением сигнала доплеровской частоты [1, 3 и т.д.], как отмечалось ранее, измерению подлежат доплеровская частота и пеленг (1), (2): этих данных достаточно для определения координат в однобазовых РЛС, т.е. при минимальном числе элементов системы.

Отказ от угловых измерений существенно упрощает конструкцию приемников. Это делает актуальной задачу построения многопозиционных (многобазовых) систем только на доплеровских измерениях.

Доплеровская система с одним передатчиком и двумя приемниками исследовалась в [7]. В основе её работы лежит связь доплеровской частоты с дальностью до цели (1). Интегрирование (1) с учетом того, что в момент t_0 пересечения целью базы $l(t_0) = d$, позволяет определить суммарную дальность [7]

$$l(t) = \begin{cases} d + \lambda \int_t^{t_0} f(t) dt, & t \leq t_0, \\ d - \lambda \int_{t_0}^t f(t) dt, & t > t_0. \end{cases} \quad (3)$$

На практике момент t_0 определяется по наблюдениям частоты $f(t)$ из условия $f(t_0) = 0$.

Суммарной дальности l в однобазовой системе соответствует линия положения в виде эллипса с фокусами в пунктах приема и излучения. В системе с двумя разнесенными приемниками (рис. 2, а) по измерениям $f_1(t)$ в приемнике Пр₁ и $f_2(t)$ в приемнике Пр₂ по формулам (3) можно определить дальности $l_1(t)$, $l_2(t)$ и соответствующие им эллипсы положения. Пере-

сечение эллипсов и даст искомое местоположение объекта. Отсюда следуют два важных вывода:

- в многопозиционной РЛС на доплеровских измерениях приемники надо располагать так, чтобы в зоне их совместной видимости находилось единственная точка пересечения эллипсов положения, однозначно определяющая координаты цели (ближайшие окрестности приемника и передатчика обычно во внимание не принимаются);
- при равноточных оценках суммарных дальностей $l_1(t)$, $l_2(t)$ для получения наилучшей точности оценки местоположения цели следует увеличивать разнос между приемниками, так чтобы острый угол между линиями положения был максимален. При этом расстояние между приемниками должно обеспечивать совместное наблюдение цели (зоны видимости бистатистических ячеек должны перекрываться).

Пример неудачного расположения приемников приведен на рис. 2, б: они вместе с передатчиком расположены на одной линии. Здесь невозможно однозначное определение координат в отличие от РЛС с правильным расположением приемников (рис. 2, а), когда они равноудалены от передатчика и насколько возможно разнесены между собой. Аналогичные выводы справедливы и для системы с одним приемником и двумя передатчиками, с той лишь разницей, что разносить надо передатчики.

Уточнение координат цели, найденных с использованием (3), по всем имеющимся на текущий момент первичным (доплеровским) измерениям можно произвести, например, методом максимального правдоподобия [7] с учетом предполагаемых модели движения цели и закона распределения ошибок измерения доплеровской частоты [5].

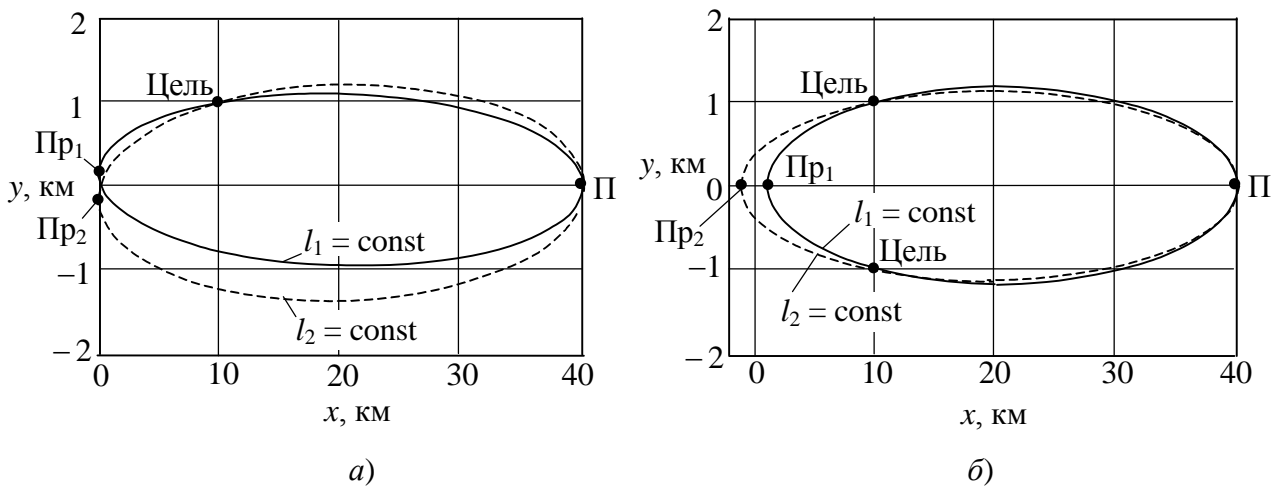


Рис. 2. Геометрия разнесенной просветной РЛС с однозначным (а) и неоднозначным (б) определением координат

Точность определения координат

При использовании метода максимального правдоподобия потенциальную точность определения траекторных параметров находят с помощью информационной матрицы Фишера [5]. Для этого распределение оценок первичных параметров полагают нормальным с нулевым средним. Траекторию цели описывают линейной моделью, что связано с узостью зоны действия системы [1, 3].

Оценка точности позволяет выявить преимущества от использования той или иной геометрии системы и определить эффект от добавления приемников и передатчиков.

Приведем методику составления матрицы Фишера и расчета соответствующей ей потенциальной точности в многобазовых системах с измерениями доплеровской частоты принимаемого сигнала.

Для линейного изменения координат цели доплеровская частота, согласно (1), в бистатической ячейке, образованной j -м передатчиком и k -м приемником, выражается следующим образом:

$$f_{jk}(\boldsymbol{\chi}) = -\frac{1}{\lambda_j} \left\{ \frac{(x - x_{пj})v_x + (y - y_{пj})v_y}{\sqrt{(x - x_{пj})^2 + (y - y_{пj})^2}} + \frac{(x - x_{пк})v_x + (y - y_{пк})v_y}{\sqrt{(x - x_{пк})^2 + (y - y_{пк})^2}} \right\}, \quad (4)$$

где λ_j – рабочая длина волны j -го передатчика; $(x_{пj}, y_{пj})$, $(x_{пк}, y_{пк})$ – координаты j -й передающей и k -й приемной антенны; $\boldsymbol{\chi}$ – вектор траекторных параметров,

$$\boldsymbol{\chi} = [x_n, y_n, v_x, v_y]^T;$$

$x_n = x(t_n)$, $y_n = y(t_n)$ – координаты цели в момент наблюдения t_n ; $x = x(t) = x_n - v_x(t_n - t)$, $y = y(t) = y_n - v_y(t_n - t)$ – координаты цели в предыдущие моменты времени t ; v_x , v_y – алгебраические проекции вектора скорости \mathbf{v} цели на координатные оси; T – знак транспонирования.

Для определенности положим, что измерения в ячейках производятся дискретно в одинаковые моменты времени t_i через один и тот же интервал T : $t_i = iT$, $i = \overline{1, n}$. В этом случае (4) определяет связь частоты принимаемого сигнала с координатами x и y , соответствующие этим моментам:

$$x = x(t_i) = x_n - v_x(n - i)T, \quad y = y(t_i) = y_n - v_y(n - i)T.$$

Результаты вычислений по (4) для системы и траектории с заданными параметрами объединим в блочную матрицу-вектор:

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\chi}) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11}(\boldsymbol{\chi}) \\ \mathbf{F}_{12}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \\ \mathbf{F}_{jk}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \text{где } \mathbf{F}_{jk}(\boldsymbol{\chi}) = \begin{bmatrix} f_{jk1}(\boldsymbol{\chi}) \\ f_{jk2}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \\ f_{jki}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \end{bmatrix},$$

а число подматриц \mathbf{F}_{jk} соответствует числу бистатических ячеек.

Производные элементов векторной функции $\mathbf{h}(\boldsymbol{\chi})$ по составляющим вектора $\boldsymbol{\chi}$ также расположим в блочной матрице:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} \\ \mathbf{H}_{12} \\ \dots \\ \mathbf{H}_{jk} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \text{где } \mathbf{H}_{jk} = \frac{\partial \mathbf{F}_{jk}(\boldsymbol{\chi})}{\partial \boldsymbol{\chi}}.$$

С учетом введенных обозначений матрица Фишера \mathbf{J} и корреляционная матрица \mathbf{Q} ошибок определения составляющих вектора $\boldsymbol{\chi}$ примут вид

$$\mathbf{J} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}, \quad \mathbf{Q} = \mathbf{J}^{-1}, \quad (5)$$

где $\mathbf{R} = \mathbf{M}\{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}^T\}$ – корреляционная матрица ошибок первичных измерений (измерений доплеровской частоты), $\Delta\mathbf{z}$ – вектор ошибок:

$$\Delta\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{F}_{11} \\ \Delta\mathbf{F}_{12} \\ \dots \\ \Delta\mathbf{F}_{lk} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \Delta\mathbf{F}_{lk} = \begin{bmatrix} \Delta f_{lk1} \\ \Delta f_{lk2} \\ \dots \\ \Delta f_{lki} \\ \dots \end{bmatrix}.$$

Диагональные элементы матрицы \mathbf{Q} (5) представляют собой минимальные значения дисперсий ошибок определения координат

$$\sigma_x^2 = Q_{11}, \quad \sigma_y^2 = Q_{22}, \quad \sigma_{v_x}^2 = Q_{33}, \quad \sigma_{v_y}^2 = Q_{44}, \quad (6)$$

которые достижимы в рассматриваемой системе.

В качестве примера численного расчета возьмем четырехбазовую систему с двумя приемниками и двумя передатчиками, расположенными так, как показано на рис. 3, а. Рабочая длина волны передатчиков $\lambda_j = 1$ м, $j = \overline{1,2}$; расстояние между j -м приемником и j -м передатчиком $d_{jj} = 40$ км. Разнесение приемников такое же, как и передатчиков, и составляет величину $b = 500$ м. Измерения частоты производятся независимо с интервалом $T = 2$ с и погрешностью $\sigma_f = 0,5$ Гц: корреляционная матрица \mathbf{R} в (5) является диагональной $\mathbf{R} = \sigma_f^2 \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица.

На рис. 4 сплошными линиями показаны графики зависимости среднеквадратического отклонения ошибки определения координаты x (6) от времени t_n для двух траекторий (обозначены цифрами 1 и 2), ограниченных значениями $1 \text{ км} < y < 2 \text{ км}$. Траектории изображены штрихом на рис. 3, а и пересекают ось Ox в точках с абсциссами 10 км и 20 км. Скорость цели $v = 200$ м/с. Так как интервал между первичными измерениями $T = 2$ с, а число позиций – 4, то временная ось характеризует и количество S_4 измерений доплеровской частоты $S_4(t_n) = 4((t_n - t_1)/T + 1)$.

Здесь же на рис. 4 штрихом изображены аналогичные графики для увеличенного до $b = 1$ км расстояния между приемниками и между передатчиками, а штрихпунктиром – при добавлении ещё одного приемника к исходной системе, как показано на рис. 3, б.

Из расчетов следует, что заметного улучшения точности можно добиться как за счет добавления позиций, так и за счет большего их разнесения. Это указывает не только на значимость числа приемников (передатчиков), но и пространственной конфигурация системы. На практике, конечно, следует учитывать сужение зоны взаимной видимости ячеек, и результаты могут быть не столь очевидны.

Расчет ошибок определения координаты y показал, что они в рассмотренных случаях существенно (на один – два порядка) меньше чем σ_x . Соотношение ошибок определения составляющих скорости v_x и v_y имеет аналогичный характер.

Дальнейшее добавление позиций, как показано на рис. 3, в, создает своеобразный “просветный коридор”, в котором одновременно срабатывают несколько ячеек, расположенных вблизи от движущейся цели. Помимо более широкой зоны действия, подобные системы за счет разнесения пунктов приема (излучения) и совместной обработки сигналов позволяют получать более полную информацию о структуре рассеянного поля, что дает дополнительные преимущества, например, в задаче распознавания объектов [4, 5].

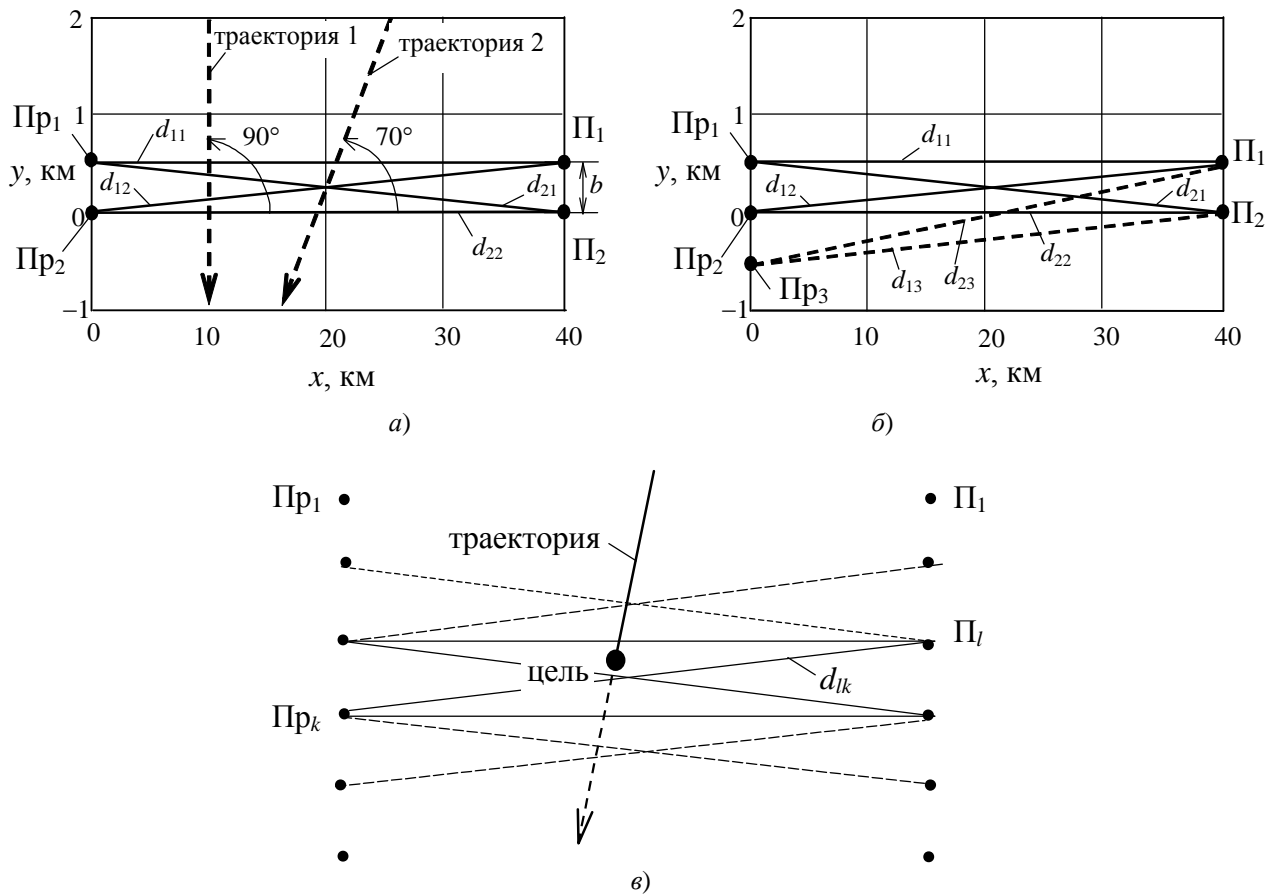


Рис. 3. Примеры просветных многопозиционных систем

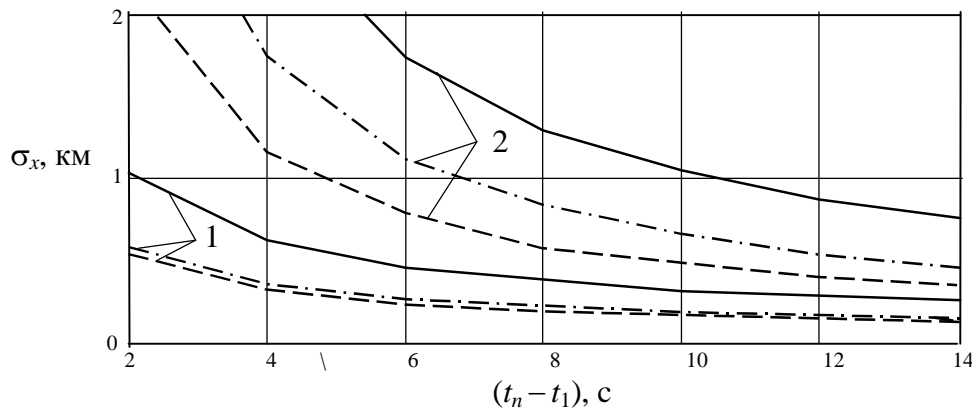


Рис. 4. Зависимость текущего среднеквадратического отклонения ошибки определения координаты x от времени t_n

Выводы

Создание просветных многопозиционных систем является одним из перспективных направлений развития просветных радиолокаторов. Поскольку в МПРЛС наиболее полно используется информация о структуре рассеянного поля, то они приобретают ряд новых и заметно улучшают имеющиеся свойства бистатических просветных систем. В частности, они способны оценивать местоположение цели исключительно по замерам доплеровской частоты принимаемого сигнала, что существенно упрощает конструкцию приемников.

Помощь в проектировании и анализе многопозиционных РЛС могут оказать рассмотренные в работе варианты построения просветных систем с прямым сигналом передатчика в качестве опорного, алгоритмы и методика расчета точности определения координат.

Библиографический список

1. **Бляхман, А.Б.** Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации «на просвет»/ А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4. С. 424–432.
2. **Уфимцев, П.Я.** Черные тела и теневое излучение// Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 12. С. 2519–2527.
3. Точность определения координат методом максимального правдоподобия при локации «на просвет»/ А.Г. Рындык [и др.]// Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 12. С. 1436–1440.
4. **Chapurskiy, V.** SISAR: shadow inverse synthetic aperture radiolocation/ V. Chapurskiy V. Sablin // IEEE International Radar Conference, Alexandria. – USA, May 2000. P. 322–328.
5. **Черняк, В.С.** Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
6. **Бакулев, П.А.** Радиолокационные системы/ П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004.– 320 с.
7. **Ковалев, Ф.Н.** Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением «на просвет»// Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331–339.

*Дата поступления
в редакцию 12.07.2011*

F.N. Kovalev

**FORWARD-SCATTERING MULTIRADARS ON THE BASIS
OF DOPPLER FREQUENCY MEASUREMENTS**

Principles of forward-scattering Doppler multiradars construction are considered. Classification of multiradars and calculation of accuracy are shown.

Key words: forward-scattering multibase radiolocation, forward-scattering multiradar, Doppler frequency, accuracy of trajectory parameters measurement.