УДК 621.396:969.1

Е.П. Ворошилина, Е.П. Ворошилин, В.И. Тисленко

Оценка координат наземного источника радиоизлучения

Представлен результат анализа сигналов на приземных трассах. Выполнен синтез алгоритма неподвижного источника радиоизлучения при наличии интенсивных переотражений от подстилающей поверхности. Приведены результаты исследования точностных характеристик предложенного подхода.

Ключевые слова: оценка координат, приземные трассы, многолучевость, разностно-дальномерный метод.

Введение

В центре внимания представленной работы стоит задача синтеза алгоритма оценки координат неподвижного источника радиоизлучения (ИРИ) пассивной разностно-дальномерной системой в условиях приема сигнала на приземных трассах. При распространении сантиметровых волн над земной поверхностью сигнал испытывает рассеяние и поглощение на неоднородностях тропосферы, а вследствие рефракции искривляется его траектория. Дифракция на закрывающем препятствии и многолучевость, за счет отражений сигнала от подстилающей поверхности, приводит к увеличению времени его распространения. Это является причиной существенных погрешностей оценки координат ИРИ [1].

Анализ условий функционирования пассивных разностно-дальномерных систем на приземных трассах

В диапазоне УКВ сигнал в значительной степени определяется рельефом и состоянием подстилающей поверхности и в меньшей степени – тропосферы [2]. Поле в точке приема является суммой поля прямой волны и большого количества элементарных вторичных волн, порожденных рассеянием от участков неровностей поверхности. На практике часто доминирующую роль в формировании поля в месте приема играет одиночное препятствие естественного или искусственного происхождения. При радиолокационном обнаружении целей и оценке их координат существенно возникновение пространственно протяженных помех, обусловленных отражениями сигнала от земной поверхности и дифракции на экранирующих препятствиях. Их интенсивность, как правило, значительно превышает уровень собственных шумов аппаратуры и является определяющей при оценке помехоустойчивости радиотехнических систем.

Многообразие и сложность процессов формирования поля в месте приема на приземных трассах не позволяют дать им исчерпывающее теоретическое описание. В связи с этим в НИИ РТС ТУСУРа в период с 1996 по 2002 г. проводились экспериментальные исследования сигналов на приземных трассах. Радиокомплекс состоял из РЛС (источник импульсного излучения трехсантиметрового диапазона) и трех измерительных пунктов (ИП), разнесенных в пространстве. Длительность излучаемого импульса $\tau_и = 300$ нс, период сканирования РЛС по азимуту – 52 с, ширина диаграммы направленности (ДН) антенны передатчика $\theta = 2$ град. В память ЭВМ записывались квадратурные составляющие принимаемых сигналов. Расстояние от ИРИ до ИП составляло 8–10 км. Исследования проводились на закрытых и полузакрытых трассах. Местность была среднепересеченная с большим количеством мелких и крупных оврагов, лесных массивов и возвышенностей. Сигнал на входе приемной антенны представлял собой суперпозицию пришедших с разных направлений и с разным временем задержки сигналов, отраженных элементами поверхности:

$$s_{пр}(t,\theta,\beta) = s_0(t-\tau_0,\theta,\beta) + \sum_{i=1}^{n} c_i s_i(t-\tau_0-\Delta\tau_i,\theta-\alpha_i,\beta),$$

где θ – направление ДН передающей антенны по отношению к приемнику в горизонтальной плоскости; β – угол места пеленгатора относительно РЛС; α_i – угловое положение переотражателя со стороны передатчика; $s_0(t-\tau_0,\theta,\beta)$ – прямой сигнал; $s_i(t-\tau_0-\Delta\tau_i,\theta-\alpha_i,\beta)$ – сигнал, отраженный (рассеянный) i-м участком трассы; c_i – весовой коэффициент; $\Delta\tau_i$ – задержка i-й компоненты сигнала.

Исследования показали, что в 30–40% случаев в окне регистрации присутствовала переотраженная компонента сигнала. Это привело к высокому содержанию ложных отметок в наблюдениях разностей моментов прихода (до 60%). Для одной из позиций передатчика на рис. 1, *а*, *б* представлены наблюдения, поступившие за время, равное четырем оборотам АС ИРИ. Черным цветом обозначены разности времен прихода, соответствующие прямому пути распространения сигнала (полезные отметки). А серым – ложные, сформированные по переотраженной компоненте сигнала.

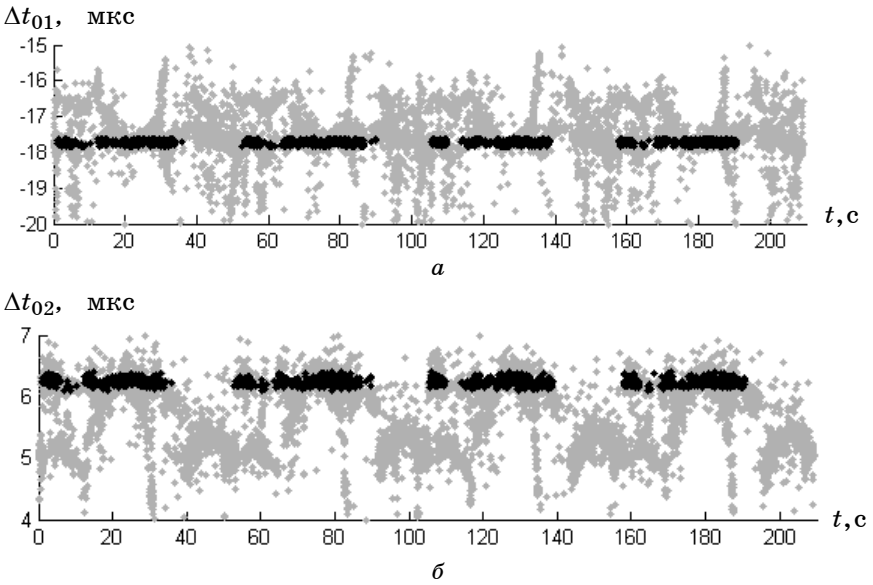

Рис. 1. Разности моментов прихода сигнала с течением времени:
а – между ИП №0 и ИП №1 (Δt_{01}); *б* – между ИП №2 и ИП №0 (Δt_{02})

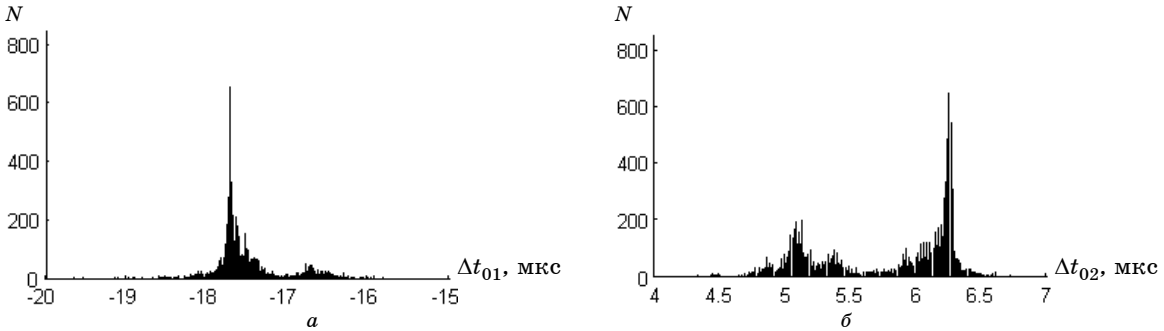

Рис. 2. Гистограмма распределения разностей моментов прихода сигнала:
а – между ИП №0 и ИП №1; *б* – между ИП №2 и ИП №0

Гистограмма распределения разности моментов прихода имеет многомодальный вид (рис. 2, *а*, *б*). Это свидетельствует о неоднородности распределения рассеивающих объектов на подстилающей поверхности. Таким образом, существуют объекты преимущественного переотражения. Их следует воспринимать как дополнительные (вторичные) источники радиоизлучения. Они порождают ложные отметки разностей моментов прихода и значительно усложняют задачу оценки координат первичного излучателя. Ведь неизвестно, какие из поступающих отметок ложные. На исследуемых трассах рассеивающим объектом являются границы лесного массива.

Алгоритмы оценки координат при наличии ложных отметок

Теория оценки координат целей при наличии ложных отметок активно развивается начиная с 70-х годов XX в. [3]. Их потенциальными источниками являются мешающие отражения (от земной поверхности, морской поверхности, атмосферных образований) и радиопомехи от собственных средств. В системах военного назначения это могут быть сигналы средств противника. Задача оценки местоположения цели в общем случае требует выполнения следующих этапов:

• завязка – процедура принятия решения о появлении цели в зоне контроля;

• распределение наблюдений – текущее наблюдение привязывается к обнаруженной цели либо полагается ложным;

• фильтрация – формирование оценки местоположения цели по наблюдениям, которые были к ней привязаны.

Оптимальный байесовский подход для решения данной задачи является нереализуемым на практике, поскольку требует неограниченного объема вычислений [4]. Поэтому были разработаны субоптимальные подходы: метод ближайшего соседа (*NN – Nearest Neighbor*) [5], алгоритм вероятностного объединения данных (*PDA – Probabilistic Data Association*) [6, 7], многогипотезный алгоритм (*Multi-Hypothesis Tracker – MHT*) [8, 9] и др. Большинство существующих подходов предназначено для работы с воздушными объектами. Однако задача оценки координат наземной цели на порядок сложнее по следующим причинам [10]:

• У наземных целей возможен более разнообразный тип движения – выше маневренность. Кроме того, воздушные цели движутся в свободном пространстве (без препятствий), чего нельзя сказать про наземные объекты. Это требует использования в блоке вторичной обработки (ВО) специальных ресурсоемких интеллектуальных алгоритмов фильтрации.

• Высокая плотность расположения наземных целей. Это усложняет задачу захвата объекта и распределения наблюдений. Воздушные цели по причине безопасности движутся достаточно далеко друг от друга.

• Наблюдается интенсивная помеховая обстановка. Многолучевое распространение за счет отражений от слоистых неоднородностей тропосферы и подстилающей поверхности, в том числе и от местных предметов (деревья, здания), приводит к существенным погрешностям измерения параметров радиосигнала и высокой плотности ложных отметок.

Выполненная проверка таких алгоритмов на экспериментальных данных, полученных для наземных трасс, показала их неэффективность. В 65% случаев местоположение передатчика определяется неверно (ошибка места достигает нескольких километров). Здесь под случаями понимается различная ориентация антенной системы (АС) ИРИ в начальный момент времени. Это в первую очередь обусловлено тем, что при их синтезе использовалось предположение о равномерном распределении ложных отметок в зоне контроля. Однако для приземных трасс характерно наличие объектов преимущественного рассеяния.

Вопросам оценки координат наземной цели в отечественной и зарубежной литературе уделяется недостаточное внимание. Только в последние 10 лет эта задача попала в центр многих исследовательских работ. Это связано с изменением требований к приемам ведения современной войны. Одно научное направление посвящено синтезу алгоритмов сопровождения сильно маневрирующих целей в условиях нелинейной и негауссовой задач фильтрации. Другое затрагивает вопросы сопровождения цели по пересеченной местности с препятствиями (обочина дороги, здания) с использованием знаний о рельефе местности (например, карт дорожной магистрали). До сих пор слабо освещено решение задачи оценки координат в сложной помеховой обстановке, обусловленной многолучевым распространением. Учет именно этого фактора является главным в представленной работе.

Таким образом, ставится задача синтеза алгоритма оценки координат наземного ИРИ в следующих условиях:

• источник радиоизлучения один и неподвижен;

• априорной информации о координатах объекта нет;

• информации о рельефе местности нет;

• антенная система ИРИ работает в режиме кругового обзора, период обращения неизвестен;

• метод определения координат – разностно-дальномерный;

• фильтрация осуществляется в режиме реального времени (оборота для «обучения» нет).

Следует отметить, что существуют некоторые модификации известных алгоритмов для их адаптации к реальной помеховой обстановке наземных трасс [11]. Однако они ориентированы на оценку координат подвижных целей. Принцип таких подходов заключается в выделении регулярного хода цели на фоне неподвижных пассивных источников ложных отметок. В рассматриваемом случае, когда ИРИ неподвижен, данный метод будет неэффективен. Задача оценки координат неподвижного объекта на фоне устойчивых интенсивных переотражений чрезвычайно сложна.

Синтез алгоритма оценки координат ИРИ при наличии переотражений от подстилающей поверхности

В процессе функционирования разностно-дальномерной системы в трех измерительных пунктах возможны следующие варианты событий:

А1: Наблюдения разностей моментов прихода сформированы по прямому сигналу (прошедшему кратчайший путь распространения). Обозначим их как $\mathbf{z}_{\text{цели}}$. Распределение таких отметок полагается нормальным.

А2: Наблюдения сформированы по сигналу, рассеянному i-м участком подстилающей поверхности. Обозначим как $\mathbf{z}_i$. Их распределение полагается многомодальным и представляет собой взвешенную сумму N нормальных плотностей, где N – количество объектов преимущественного переотражения.

А3: Наблюдения сформированы по сигналу, порожденному разными источниками. Например, в первом пункте по прямому, а во втором и третьем – по сигналу от i-го и j-го рассеивателей, соответственно. Обозначим их как $\mathbf{x}_{\text{хаот}}$ (хаотические). Распределение таких ложных отметок полагается равномерным в зоне контроля.

Интервал времени, в течение которого происходит одно из трех событий, случаен и неизвестен. На основе этого предложена следующая модель наблюдений, поступающих на вход вычислителя координат:

$$\mathbf{Z}(k)=\left(\bigcup R_{\text{обн}}(k)\cdot\mathbf{z}_{\text{цели}}(k)\right)\cup\left(\bigcup_{i=1,\ldots,N} R_i(k)\cdot\mathbf{z}_i(k)\right)\cup\left(\bigcup R_{\text{хаот}}(k)\cdot\mathbf{z}_{\text{хаот}}(k)\right), \quad (1)$$

где случайные величины $R_{\text{обн}}$, R_i и $R_{\text{хаот}}$ принимают значение 0 или 1 и отражают факт обнаружения или необнаружения соответствующего сигнала; k – текущий такт.

Это означает, что на каждом такте в блок ВО поступает случайное число полезных отметок (соответствующих прямому пути распространения сигнала) и случайное число ложных (соответствующих удлиненному пути распространения сигнала). Все генеральные последовательности наблюдений имеют похожие распределения и отличаются средним значением и дисперсией. Среднее значение характеризует физические координаты цели или рассеивающих объектов. Оцениванию подлежит вектор $\mathbf{x}(k)=\begin{pmatrix} x_ц(k) \\ y_ц(k) \end{pmatrix}$, информация о котором содержится в наблюдениях $\mathbf{z}_{\text{цели}}(k)$. Задача выделения из смеси (1) полезного сигнала и представляет основную сложность.

Предложенный алгоритм разделяет поступающие наблюдения не на класс ложных или порожденных целью, а на потоки, принадлежащие разным объектам. Под объектами понимаются первичный источник излучения (передатчик) и вторичные источники излучения (объекты преимущественного рассеяния). Это является ключевой особенностью представленного подхода. Структурная схема алгоритма приведена на рис. 3.

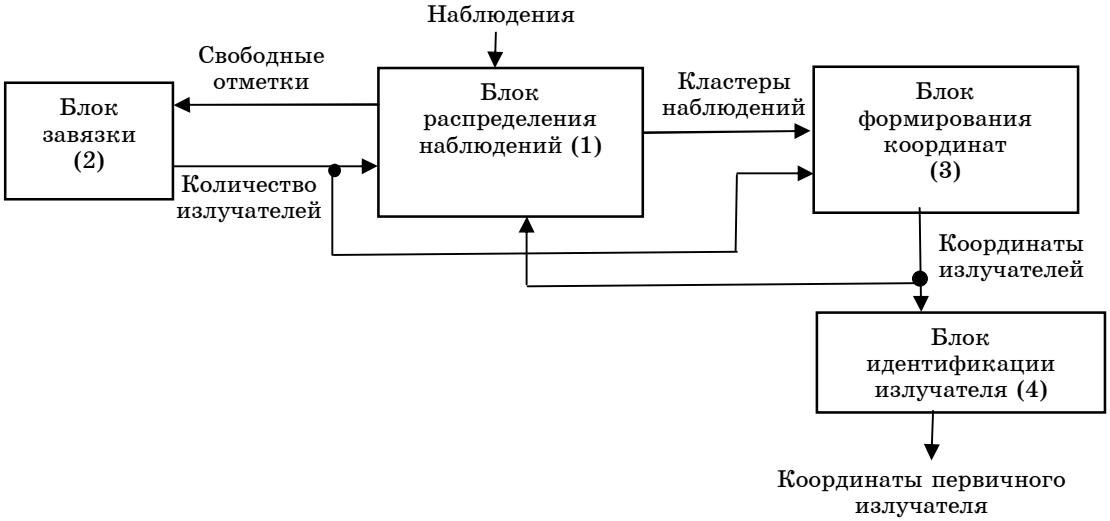

Рис. 3. Структурная схема алгоритма оценки координат ИРИ

Предложенный алгоритм оценки координат ИРИ состоит из следующих этапов, выполняемых в режиме реального времени:

1) определение количества излучателей (первичного и вторичных) и предварительная оценка их координат в блоке завязки;

2) распределение наблюдений (привязка отметки к одному из обнаруженных излучателей);

3) уточнение в блоке формирования координат местоположения каждого излучателя по привязанным к нему на текущем такте наблюдениям;

4) идентификация первичного излучателя.

В качестве метода завязки был выбран подход, использующий логический критерий «m из N» [1]. Тем самым формируются последовательности, соответствующие устойчивому потоку наблюдений, порожденных либо ИРИ, либо объектом преимущественного рассеяния. Остальные отметки полагаются ложными (свободными). Обработка экспериментальных данных показала, что в ходе этой процедуры отбраковывается до 40% ложных наблюдений.

Функцию распределения наблюдений и формирования координат выполняет алгоритм вероятностного объединения данных (*PDA*). Он является рекурсивным субоптимальным байесовым подходом и предназначен для формирования оценки координат целей при наличии ложных отметок. Выбор обусловлен тем, что алгоритм позволяет достичь приемлемых точностных характеристик при невысоких вычислительных затратах.

В блоке идентификации реализуется алгоритм принятия решения о том, какой из обнаруженных излучателей является первичным. Ведь именно его координаты представляют основной интерес. Логические рассуждения и анализ экспериментальных данных позволили сформировать следующие идентификационные признаки:

- Амплитуда огибающей импульса, соответствующего прямому пути распространения, больше амплитуды огибающей переотраженного в промежуток времени, когда АС ИРИ направлена на ИП.
- Дисперсия отметок моментов прихода по прямому сигналу меньше, чем по переотраженным.
- Координата объекта, сформированная по отметкам моментов прихода, соответствующих прямому пути распространения сигнала, лежит на пересечении ДН АС измерительных пунктов.

Первые два пункта основаны на том, что при рассеянии сигнал испытывает дополнительное ослабление по сравнению с прямым. Кроме того, за счет неоднородности и флуктуации подстилающей поверхности появляются дополнительные флуктуации момента прихода переотраженного сигнала. Третий пункт позволяет отбросить те наблюдения, которые сформированы при событии А3. Они зачастую соответствуют фиктивной координате, не лежащей даже на пересечении ДН АС ИП. Обработка экспериментальных данных показала, что таким образом можно отбросить до 25% ложных отметок. Следует отметить, что на практике предположение №1 не всегда справедливо. Например, в случае, когда источник излучения экранирован препятствием в направлении на ИП, а с других направлений открыт. Однако такая задача относится к радиолокационной ситуации с чрезвычайно сложной помеховой обстановкой. Ее решение без привлечения дополнительной информации не представляется возможной. Но это противоречит условию функционирования системы, при котором предполагается наличие минимума сведений об объекте и подстилающей поверхности.

Предложенный алгоритм оценки координат для своего функционирования требует задания следующих параметров: критерий завязки m из N и значение ожидаемой дисперсии наблюдений разностей моментов прихода σ. Эффективность подхода была подтверждена на экспериментальных данных. В частности, для рассматриваемой радиолокационной обстановки вероятность неверной оценки местоположения ИРИ снизилась в среднем с 0,6 до 0,03 по сравнению популярным на практике алгоритмом *PDA*. Средняя ошибка места оставила 35 м на дальности 12 км в условиях наличия интенсивного потока ложных отметок. Рассевающим объектом выступало протяженное препятствие – кромка леса. Среднее число сбойных реализаций (ошибка места превысила 100 м) составило 3%. Сбойная реализация обусловлена неверной кластеризацией отметок на этапе завязки и распределения наблюдений, а также неверной идентификации первичного излучателя.

В таблице приведен результат оценки выигрыша в точности, который обеспечивает предложенный алгоритм по сравнению с алгоритмом *PDA*.

Средняя ошибка оценки координат ИРИ

Позиция	Алгоритм	Среднее значение ошибки места $\Delta R_{ср}$, м	СКО ошибки места $\sigma_{\Delta R}$, м	Вероятность, что ошибка места превысит 100 м $P(\Delta R > 100$ м$)$
1	*PDA**	7,52	4,3	0
	PDA	960	817	0,41
	Предложенный	16,12	10,5	0
2	*PDA**	13,5	7,7	0
	PDA	125	113	0,43
	Предложенный	27,6	21,6	0
3	*PDA**	16	9,2	0
	PDA	397	299	0,51
	Предложенный	25,3	9,42	0

В таблице указаны значения средней ошибки места и ее СКО после обработки наблюдений алгоритмом *PDA* и предложенным подходом. В строке с обозначением «*PDA**» отображены соответствующие значения при подаче на вход вычислителя только полезных отметок. Они характеризуют точность оценки местоположения, близкую к потенциальной. Усреднение проводилось по 50 реализациям, соответствующим разной ориентации АС ИРИ в начальный момент времени. В последней колонке указана вероятность появления сбойных реализаций (ошибка места превысила 100 м).

По данным таблицы видно, что точностные характеристики предложенного подхода уступают потенциально возможным (полученным в отсутствие ложных отметок) примерно в 2 раза. Но при работе на приземных трассах при наличии интенсивных переотражений от подстилающей поверхности, алгоритм *PDA* теряет свою работоспособность. В 45% случаев формируется неверная оценка координат ИРИ. Она превышает 100 м и достигает нескольких километров. Средняя ошибка места составляет сотни метров.

Заключение

Распределение задержек сигнала на наземной трассе обусловлено геометрическим распределением рассеивающих неоднородностей, расположенных на подстилающей поверхности данной трассы. Задержки рассеянных сигналов достигают десятки микросекунд и ограничены лишь длительностью окна регистрации. На исследуемых трассах отражающими объектами являются границы лесного массива.

Обзор алгоритмов оценки координат цели при наличии ложных отметок показал, что большинство из них синтезированы для работы с воздушными объектами. Путем обработки экспериментальных данных было показано, что они неэффективны для оценки координат наземного ИРИ. В 65% случаев местоположение передатчика определялось неверно и ошибка места достигала нескольких километров. В отечественной и зарубежной литературе вопросам оценки координат наземной цели при наличии интенсивных переотражений уделяется недостаточное внимание.

Проверка предложенного алгоритма оценки координат ИРИ на экспериментальных данных для наземных трасс показала его эффективность. Средняя ошибка места оставила 35 м на дальности в 12 км при наличии интенсивного потока ложных отметок. Вероятность неверной оценки местоположения ИРИ снизилась в среднем с 0,6 до 0,03 по сравнению с широко используемым на практике алгоритмом вероятностного объединения данных.

Предложенный подход теряет работоспособность только в чрезвычайно сложной помеховой обстановке (дисперсия наблюдений разностей моментов прихода превышает расстояние между передатчиком и объектами преимущественного переотражения; прямой сигнал нигде не превалирует над переотраженным и т.п.). Однако ее решение без привлечения дополнительной информации и не представляется возможной. Но это противоречит условию функционирования системы, при котором предполагается наличие минимума сведений об объекте и подстилающей поверхности.

Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Государственный контракт № 02.740.11.0183)

Литература

1. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.

2. Введенский Б.А. Распространение ультракоротких радиоволн. – М.: Наука, 1973. – 407 с.

3. Pulford G.W. Taxonomy of multiple target tracking methods // IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation. – 2005. – Vol. 152, №5. – P. 291–303.

4. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.

5. Li X.R. Tracking in clutter with nearest neighbor filters: analysis and performance / X.R. Li, Y. Bar-Shalom // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 1996. – Vol. 32, №3. – P. 995–1010.

6. Kirubaraian T. Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter / T. Kirubaraian, Y. Bar-Shalom // Proc. IEEE. – 2004. – Vol. 92, №3. – P. 536–557.

7. Bar-Shalom Y. Tracking methods in a multitarget environment // IEEE Trans. Automatic Control. – 1978. – Vol. AC-23, № 4. – P. 618–626.

8. Reid D.B. An algorithm for tracking multiple targets // IEEE Trans. Automatic Control. – 1979. – Vol. AC-24, № 6. – P. 843–854.

9. Chang K.-C. Evaluating a multiple-hypothesis multitarget tracking algorithm / K.-C. Chang, S. Mori // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 1994. – Vol. 30, №2. – P. 578–590.

10. Chong C.-Y. Ground target tracking – a historical perspective / C.Y. Chong, D. Garren, T.P. Grayson // Aerospace conference proceedings IEEE. – San Francisco, 2000. –Vol. 3. – P. 433–448.

11. Chen J. A modified probabilistic data association filter in a real clutter environment / J. Chen, H. Leung, T. Lo // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 1996. – Vol. 32, №1. – P. 300–313.

Ворошилина Елена Павловна
Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: Raliens@sibmail.com

Ворошилин Евгений Павлович
Старший преподаватель каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: vep2007@kvadro.net

Тисленко Владимир Ильич
Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

Voroshilina E.P., Voroshilin E.P., Tislenko V.I.
Ground target position estimation

The article presents the analysis of signal propagation at the Earth surface. This paper introduces a new algorithm for estimation of stationary radio-frequency source coordinates in range-difference location with re-reflected signals. The workability of the algorithm is confirmed by experimental data.
Keywords: target position estimation, surface trace, multipath propagation, range-difference location.