

## ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, РАССЕЯННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

д.т.н. В.К. Иванов, Н.В. Бархударян, к.т.н. А.З. Сазонов

*В статье с использованием методики, разработанной для расчетов поля, рассеянного крупногабаритным объектом в его ближней зоне, на основе большого объема расчетного материала исследуются вопросы, связанные с влиянием пространственной конфигурации поля на точность измерения угловых координат объекта.*

**Постановка задачи.** Исследование явления “блуждания” мгновенного радиолокационного центра отражения (углового шума) сложной, пространственно-протяженной цели, возникающего при интерференции волн, рассеянных отдельными ее элементами, продолжается уже более полувека [1 – 4]. Интерес к нему поддерживается постоянным стремлением разработчиков радиолокационных систем наведения к уменьшению ошибок измерения угловых координат объектов бортовыми пеленгаторами.

Наличие угловых ошибок обусловлено флуктуациями измеряемых направлений прихода в апертуру приемной антенны электромагнитных волн, рассеянных объектом [5]. Флуктуации возникают при движении антенны относительно объекта вследствие пересечения ею пространственной структуры вторичного поля рассеивателя. Интенсивность их зависит от характеристик этой структуры, от траектории и скорости относительного движения объекта и приемной антенны. Кроме того, они связаны с трансформацией указанной пространственной структуры поля во времени в результате перемещения, поворотов, вибрации самого объекта и изменения свойств среды распространения.

Как установлено теоретически и подтверждено экспериментально, направление пеленга цели может флуктуировать в пределах, превышающих ее угловые размеры [6]. Эта особенность углового шума приводит к увеличению вероятности промаха при использовании радиолокационных систем в комплексах ракетного оружия с головками самонаведения. Поэтому проблема исследования углового шума и методов его снижения является весьма актуальной и в настоящее время. Помимо этого, реше-

ние аналогичных задач может быть важным и в других областях технической деятельности человека, например, при решении задачи предотвращения столкновений кораблей и при управлении воздушным движением. В космосе радиолокационные устройства подобного типа могут быть использованы в качестве вспомогательных средств измерений при сближении и стыковке космических аппаратов [7].

Точность измерения угловых координат современных радиолокационных систем ограничивается ошибками, определяемыми интенсивностью углового шума цели и уровнем шумов приемной аппаратуры. Известно, что влияние шумов приемника возрастает пропорционально квадрату расстояния от цели  $r$ , пока усиление его не становится максимальным, т.е. наступает насыщение, тогда как ошибки пеленгации, вызываемые угловыми шумами, изменяются обратно пропорционально расстоянию [8]. По этой причине в ближней зоне рассеивателя действие угловых шумов может привести к преждевременному срыву сопровождения или сходу с траектории наводимого объекта [9].

**Цель статьи.** Физической причиной возникновения ошибок измерения угловых координат цели является искажение пространственно-временной структуры рассеянного электромагнитного поля. Ввиду этого, представляется актуальным определение конфигурации этого поля в окружающей цель области пространства и, особенно, в непосредственной близости от цели, где обнаруживается сильное влияние нерегулярности ее поверхности. Важно также установить, не изменяется ли вид законов распределений мгновенных значений амплитуд и фаз рассеянного поля в ближней зоне цели, и найти параметры этих законов. Располагая полученными данными, можно будет предложить технические решения, которые позволили бы снизить влияние угловых шумов на процесс измерения угловых координат реальных целей в ближней зоне.

**Литература,** опубликованная по данной тематике, достаточно широко и полно охватывает перечень рассматриваемых вопросов. Среди них нужно отметить разработку моделей, использующих различные электродинамические методы получения радиолокационных характеристик объектов сложной формы, например, [10, 11], поскольку очевидно, что чем большее количество факторов, влияющих на формирование рассеянного поля, будет учтено в модели, тем более тонкие эффекты могут быть обнаружены и исследованы. Уделяется внимание и исследованию статистических параметров флуктуаций излучения источников различного типа [12]. Требованиям времени отвечает разработка математических моделей, описывающих амплитудный, угловой и дальномерный шумы цели вблизи границ раздела сред [13]. В [14] на примерах ряда схемных

реализаций бортовых моноимпульсных радиолокационных систем анализируются возможности снижения влияния угловых шумов сложных целей с использованием методов цифровой обработки сигналов.

Однако угловой шум рассматривается практически всеми авторами в виде стационарного случайного процесса, тогда, как известно, что в ближней зоне поведение его обнаруживает существенную нестационарность, обусловленную влиянием кривизны поверхности цели [15]. И, хотя время, в течение которого проявляется эта нестационарность, составляет в целом несколько секунд ( $\sim 5 - 10$  с), величина эквивалентных постоянных времени известных систем управления – более чем на порядок меньше ( $\sim 0,1 - 0,4$  с). Возникающие вследствие этого большие отклонения равносигнального направления от направления на цель могут вывести рабочую точку пеленгационной характеристики углового дискриминатора приемной антенны за пределы ее линейного участка. Работа системы управления наводимого объекта еще более усложняется тем, что в ее составе имеются устройства с нелинейными передаточными характеристиками. Таким образом, необходимость определения параметров нестационарного процесса на входе антенны пеленгатора, находящейся в ближней зоне сложного объекта, очевидна.

Для решения этой задачи необходимо было рассчитать рассеянное объектом электромагнитное поле. В аналитическом виде, как известно, решение можно получить только для очень ограниченного класса объектов [16]. Однако, в связи с прогрессом в вычислительной технике, в электродинамике все более широко применяются численные методы решения. Это позволяет полностью заменить физический эксперимент расчетом, что дает существенные преимущества, поскольку результат с любой заданной точностью может быть получен намного быстрее и дешевле.

Методика расчета, основанная на представлении поверхности объекта с помощью фрагментов трехосных эллипсоидов (рис. 1), детально описана в [17, 18]. В этих же работах получены соотношения для расчета ближнего поля, при выводе которых использована обобщенная лемма Лоренца в интегральном представлении. Поверхность всего объекта с помощью налагаемой сетки расчленяется на множество элементов одинаковой формы (фацетов). Затем путем численного интегрирования плотностей поверхностных токов, наведенных падающей электромагнитной волной, определяются поля, отраженные от каждого фацета, и суммируются. При вычислениях используются специальные кубатурные формулы, позволяющие интегрировать быстроосциллирующие функции. В результате расчетов получаем амплитудные и фазовые диаграммы поля рассеяния в заданном секторе углов. Такой метод расчета имеет ряд

важных достоинств, основные из которых следующие: отсутствие значительных ограничений на геометрию цели и гибкость ее изменения, более точный учет фазовых соотношений полей, рассеянных отдельными факетами, возможность учета переотражений между элементами конструкции цели и затенения одних ее частей другими.

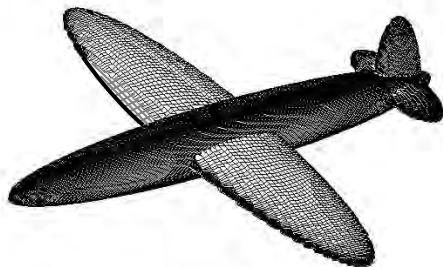


Рис. 1. Простейшая модель поверхности самолета, состоящая из четырех эллипсоидов

Рассмотрим некоторые результаты расчетов, проведенных в соответствии с описанной методикой. Так, на рис. 2 приведены амплитудные диаграммы рассеянного поля крупногабаритного объекта (самолета Boeing-707) при совмещенном приеме на различных расстояниях от него. Обход осуществлялся в плоскости крыла, при этом за нулевое принято направление продольной оси самолета. Для наглядности на графиках по оси ординат отложена не амплитуда поля, а ее логарифм, по оси абсцисс – расстояние  $r$  от объекта.

В ближней зоне объекта при интегрировании полей, рассеянных элементарными факетами, различиями в их амплитудах можно пренебречь, однако обязательно необходимо учитывать набег фазы [19]. Наличие у векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  рассеянного поля наряду с поперечной также и продольной компоненты приводит к тому, что, структура поля оказывается более сложной, чем в дальней зоне. Зависимость от  $r$  не имеет характера сферической волны  $e^{-jkr}/r$  [18]. Кроме того, от  $r$  зависит также и угловое распределение амплитуд поля.

Анализ рис. 2 показывает, что при переходе из дальней зоны в ближнюю наблюдается смещение пиковых значений амплитуд (до  $4,5^\circ$  в сторону хвостового оперения) и расширение главного лепестка вторичного излучения. При уменьшении расстояния  $r$  главный лепесток

углового распределения амплитуд поля раздваивается и частично сливается с боковыми лепестками. Таким образом, в данном случае имеется аналогия с трансформацией диаграммы направленности антенны при возрастании в ее амплитудно-фазовом распределении уровня квадратичных и кубических искажений [20].

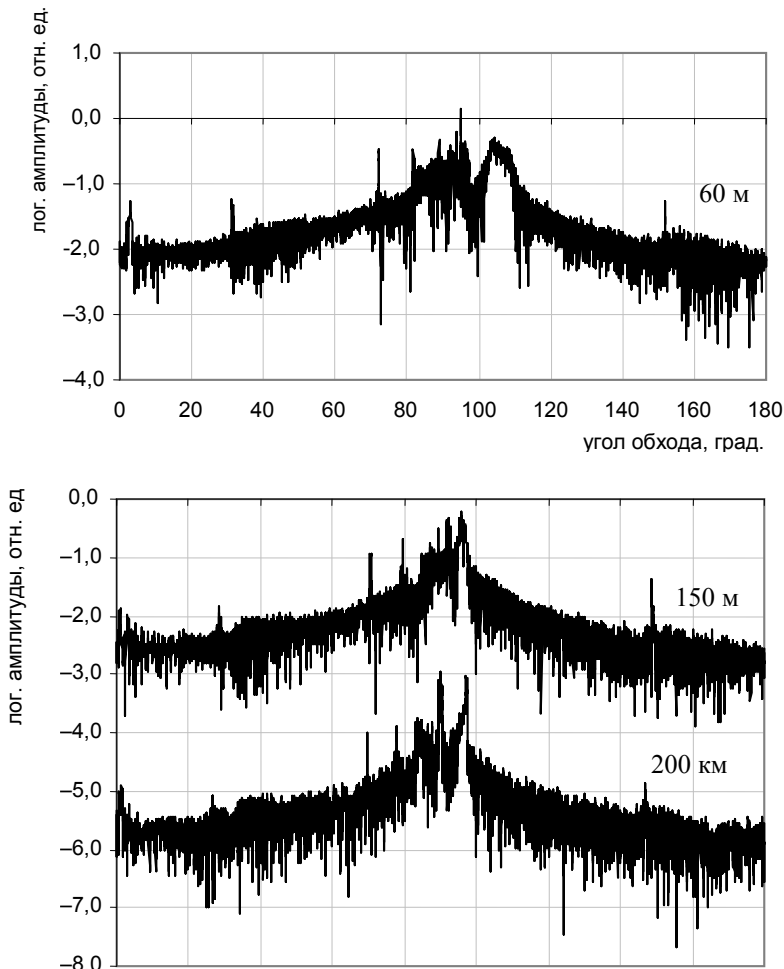


Рис. 2. Амплитудные диаграммы рассеянного поля самолета Boeing-707 в ближней (60, 150 м) и дальней зонах (200 км)

На рис. 3 представлена зависимость амплитуды рассеянного поля от расстояния для самолета с максимальным линейным размером ~20 метров. Для сравнения, на том же рисунке приведена кривая для амплитуды

поля, рассеянного идеально проводящим шаром с радиусом 10 метров. Из графиков следует, что на монотонное убывание поля по закону  $1/r$ , как в случае проводящего шара, накладывается осциллирующее затухающее колебание. Осцилляции амплитуд в ближней зоне объясняются интерференцией волн, приходящих в точку наблюдения от различных зон Френеля на поверхности цели, причем частота этих осцилляций тем выше, чем ближе точка наблюдения к поверхности. Для объектов со сложной формой поверхности такая картина зависимости амплитуды поля от расстояния является типичной, однако среднее значение амплитуды меняется в зависимости от ракурса подхода к цели.

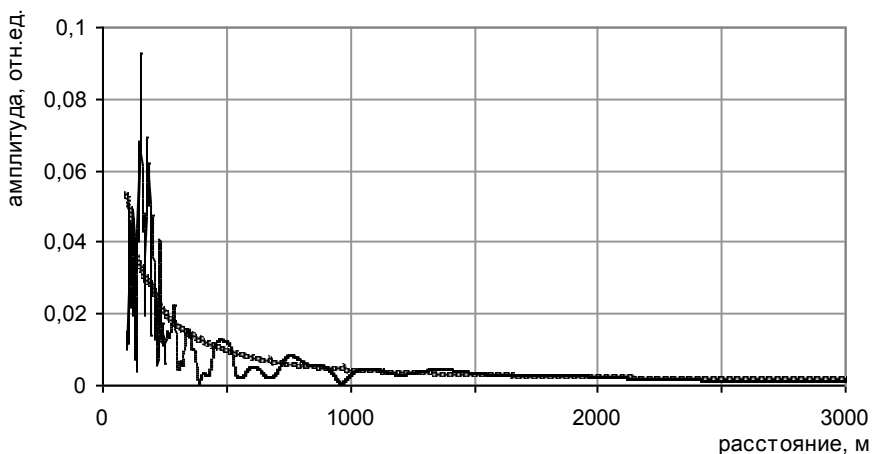


Рис 3. Зависимость амплитуды рассеянного поля от расстояния до цели. Для сравнения показан график для идеально проводящего шара. Максимальный поперечный размер цели и шара – одинаковы (~20 м)

Так как в процессе движения приемная антенна пеленгатора ориентируется относительно цели случайным образом, для решения задачи необходимо определить усредненные по всем возможным углам подлета характеристики рассеянного поля. Траектория движения наводимого объекта на конечном участке обычно проходит таким образом, что он движется к цели с постоянной радиальной скоростью  $V$ . В сферической системе координат, связанной с целью, амплитуда и фаза поля в ближней зоне являются функциями углов облучения и приема, а также расстояния  $r$  до точки приема. Следовательно, на вход приемной антенны в каждый момент времени  $t = \frac{r(t)}{V}$  поступает сигнал, зависящий от некоторой комбинации вышеука-

занных углов из всей их совокупности на данном расстоянии  $r$ . Другими словами, величина  $r$  определяет сечение случайного процесса на входе приемной системы в момент времени  $t$ . Рассчитав параметры закона распределения случайной величины от сечения к сечению, можно сделать определенные выводы о характере протекания процесса во времени.

Выявление параметров закона распределения некоторой случайной величины предполагает накопление определенного объема экспериментальных данных и последующую их обработку методами математической статистики. В работе эти данные были получены описанным выше способом при варьировании углов облучения и приема волн. Объем их составил 360000 отсчетов для каждого из расстояний  $r$ , равных 100, 300, 500, 2000 м и 200 км. Чтобы представить результаты в наглядной форме, построены гистограммы распределений амплитуд и фаз рассеянного поля. Так, на рис. 4 представлены гистограммы, построенные по данным расчетов в ближней зоне (300 м) крупногабаритной цели.

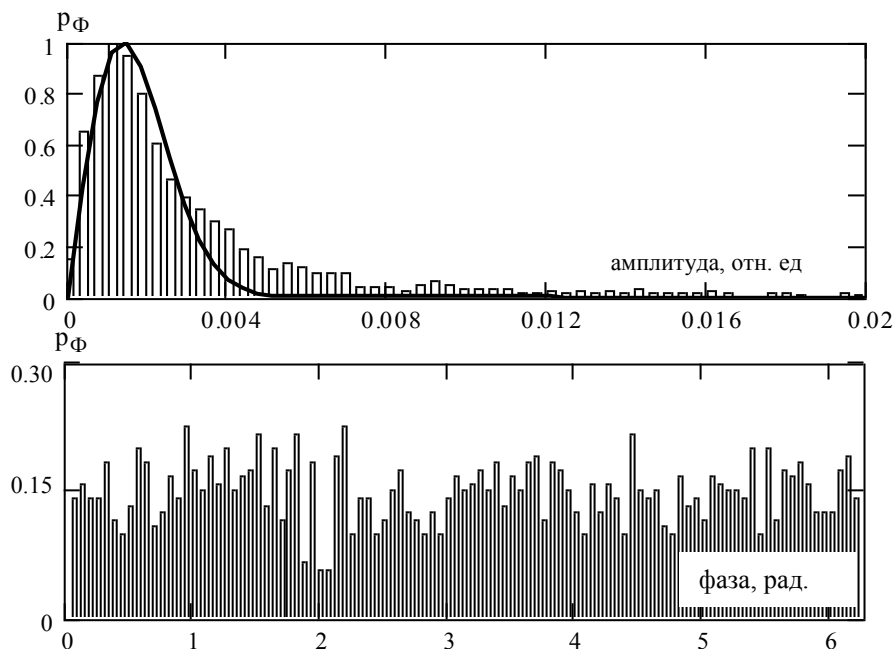


Рис. 4. Гистограммы распределений мгновенных значений амплитуд и фаз рассеянного поля в ближней зоне (300 м) крупногабаритного аэродинамического объекта (Boeing-707)

Число интервалов  $n$ , на которые разбит весь диапазон изменения значений случайных величин, выбрано равным 100. Значения амплитуд и

фаз, отвечающие номерам интервалов, отложены по оси абсцисс, по оси ординат – относительные частоты попадания в интервалы:  $p_A$  – амплитуд и  $p_\phi$  – фаз, соответственно. Поскольку количество отсчетов в выборке данных конечно, возникает задача выравнивания статистических рядов. Это значит, что необходимо найти такую гладкую функцию, с помощью которой можно было бы наилучшим образом описать данное статистическое распределение. Как правило, принципиальный вид такой функции можно выбрать из соображений, связанных с существом задачи, в некоторых случаях – просто по внешнему виду графика статистического распределения [21]. Аналитическое выражение выбранной функции распределения зависит от некоторых параметров. Задача выравнивания статистического ряда, таким образом, переходит в задачу определения таких значений параметров, при которых соответствие между статистическим и теоретическим распределениями оказывается наилучшим.

Анализ рис. 4 приводит к выводу, что распределение мгновенных значений амплитуд рассеянного сложной целью поля подчиняется закону Рэлея, аналитическое выражение которого имеет вид

$$f(x, \sigma) = \begin{cases} 0 & (-\infty < x < 0) \\ \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) & (0 < x < \infty), \end{cases}$$

где  $\sigma$  – параметр закона.

Чтобы его найти, применим метод наименьших квадратов, т.е. будем минимизировать сумму  $F(\sigma)$  квадратов отклонений теоретического  $f(x_i, \sigma)$  распределения от расчетного  $f_i$ :

$$F(\sigma) = \sum_{i=0}^n [f(x_i, \sigma) - f_i]^2 \rightarrow \min.$$

Для определения экстремума функционала приравняем нулю производную по параметру  $\sigma$

$$\frac{dF(\sigma)}{d\sigma} = \frac{2}{\sigma^3} \sum_{i=0}^n x_i \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right) \left[ \frac{x_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right) - f_i \right] \left[ \frac{x_i^2}{\sigma^2} - 2 \right] = 0.$$

Параметр  $\sigma$  найдем численным методом (в нашем примере  $\sigma = 0,00138$ ). Убедиться в правильности решения позволяет рис. 5, на котором представлено поведение  $F(\sigma)$  при изменении  $\sigma$  в пределах, содержащих искомое значение. Именно при найденном значении параметра  $\sigma$  функционал имеет минимум.



Что касается распределения мгновенных значений фаз рассеянного поля, то непосредственно из гистограммы видна близость его равномерному закону. Относительная частота попадания значений фаз в выбранные интервалы приблизительно равна 0,15. Это свидетельствует о том, что количество элементов в выборке достаточно для того, чтобы считать ее состоятельной.

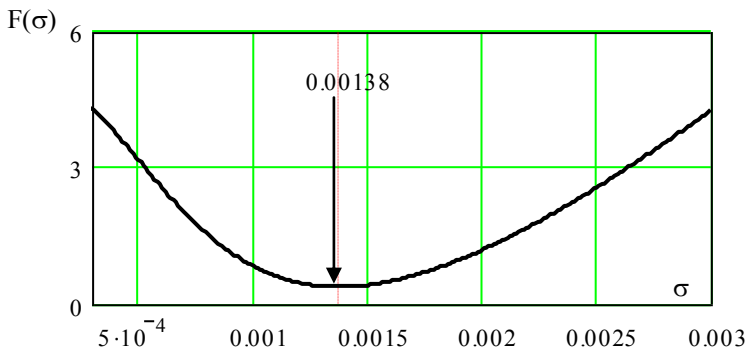


Рис. 5. К определению параметра закона распределения методом наименьших квадратов

По описанной выше методике проведены расчеты для некоторых типов целей, а именно: для простейшей модели, аэродинамической мишени Ту-243 "Рейс", турбовинтового бомбардировщика Boeing-26, самолета дальнего радиолокационного обнаружения E-3C AWACS Boeing-707, групповой цели в составе двух B-26 (табл. 1).

Таблица 1

Среднеквадратичное отклонение амплитуд S

Тип цели	Максим. линейный размер, м	Среднеквадратичное отклонение амплитуд S на различных расстояниях от цели				
		100 м	300 м	500 м	2000 м	200 км
Ту-243 "Рейс"	8,29	0,00048	0,00013	0,00008	0,00002	0,0000002
Турбовинтовой бомбардировщик Boeing-26	21,75	0,00239	0,00081	0,00047	0,00012	0,0000012
Простая модель цели	22,00	0,00237	0,00052	0,00032	0,00008	0,0000008
E-3C "AWACS" Boeing-707	46,61	0,00249	0,00090	0,00051	0,00013	0,0000012
Групповая цель	116,00	0,00536	0,00215	0,00119	0,00032	0,0000032

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что вид законов распределения мгновенных значений амплитуд и фаз рассеянного поля как в дальней, так и в ближней зонах остается неизменным. Главной же особенностью является то, что с уменьшением расстояния до цели среднеквадратическое отклонение (СКО) значений мгновенных амплитуд увеличивается. Это связано с возрастающим влиянием кривизны поверхности цели и ее геометрической конфигурации на формирование вторичного поля. Представим зависимость графически (рис. 6), для чего необходимо пересчитать максимальный линейный размер целей в угловую меру для различных расстояний. Функцией регрессии, приближающей совокупность исходных точек с наименьшей среднеквадратичной погрешностью, является прямая линия, уравнение которой

$$S^*(\gamma) = 2,446 \cdot 10^{-4} \gamma + 2,718 \cdot 10^{-4},$$

где  $\gamma$  – угловой размер цели.

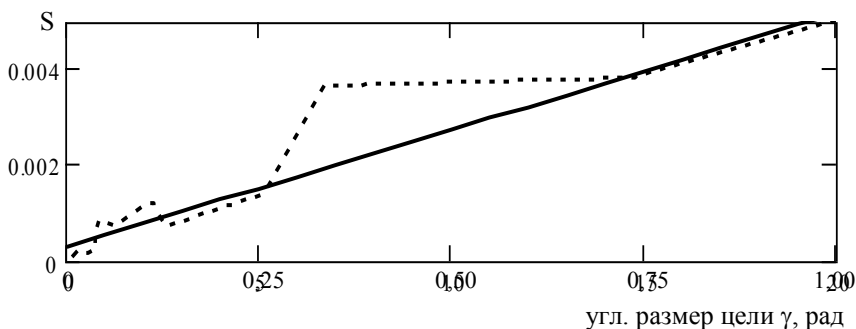


Рис. 6. Обобщенная по нескольким типам целей зависимость среднеквадратического отклонения  $S$  значений амплитуд рассеянного поля от углового размера цели. Сплошной линией показана прямая регрессии.

При этом коэффициент корреляции между точками полученной зависимости и линии регрессии равен 0,97. Таким образом, установлена линейная зависимость СКО значений амплитуд поля от углового размера цели как в дальней, так и в ближней зоне.

**Выводы.** Флуктуации интенсивности поля мгновенного радиолокационного центра отражения при сближении пеленгатора с объектом определяются основными двумя причинами: движением пеленгатора через неоднородную структуру вторичного поля и колебаниями объекта. Ни одним из этих факторов возникновения флуктуаций в ближней зоне объекта пренебрегать нельзя.

Предложенные модели целей, несмотря на отличие некоторых характеристик рассеянного поля, полученные при моделировании, могут

быть использованы для оценки работы реальных систем с радиолокационными головками самонаведения при моделировании на ПЭВМ, т.к. в реальных условиях характеристики рассеянного поля изменяются в гораздо больших пределах, чем отличия, возникающие при моделировании.

Анализируя величину дисперсии (СКО) сигнала, можно проводить распознавание класса цели по ее поперечным размерам.

Известно, что функционирование системы управления зенитной управляемой ракеты можно описать дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами в том случае, когда параметры входящих в нее устройств не изменяются во времени [22]. Возрастание СКО (дисперсии) амплитуды поля свидетельствует о том, что на вход системы управления в ближней зоне цели поступает реализация нестационарного случайного процесса. Исследуя поведение системы управления, можно определить условия, когда при отработке такого рода воздействий происходит либо срыв автосопровождения цели головкой самонаведения ракеты, либо другая негативная реакция системы управления (например, резкий отворот рулей и уход ракеты в сторону), и, следовательно, предложить ряд мер по снижению влияния указанных факторов на точность наведения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Делано Р. Теория "мерцания" цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении // Вопросы радиолокационной техники. – 1954. – № 1. – С. 108 – 119.
2. Данн Дж., Ховард Д. Влияние автоматической регулировки усиления на точность сопровождения целей моноимпульсными радиолокационными системами // Радиотехника и электроника за рубежом. – 1959. – № 5(53) – С. 157 – 167.
3. Петерс Л., Веймер Ф. Радиолокационное сопровождение сложных целей // Зарубежная радиоэлектроника. – 1964. – № 7. – С. 17 – 44.
4. Островитянов Р.В. К вопросу об угловом шуме // Радиотехника и электроника. – 1966. – № 6(54). – С. 96 – 113.
5. Данн Дж., Ховард Д., Кинг А. Влияние флуктуаций эхо-сигнала на работу радиолокационных станций сопровождения цели // Радиотехника и электроника за рубежом. – 1959. – Т. 9. – Вып. 4. – С. 592 – 601.
6. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
7. Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем) / Пер. с англ. Под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969. – 704 с.
8. Леонов А.И., Фомичёв К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Сов. радио, 1970. – 392 с.
9. Линдсей Дж.Е. Угловое мерцание и движущаяся вращающаяся сложная радиолокационная цель // Зарубежная радиоэлектроника. – 1968. – № 12. – С. 42 – 57.
10. Ковалёв С.В., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Расчет радиолокационных ха-

- рактистик объектов с учетом влияния поверхностных волн и целевых образований // *Радиотехника и электроника*. – 1998. – Т. 43. – № 1. – С. 37 – 46.
11. Ковалёв С.В., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Расчет радиолокационных характеристик объектов в ближней зоне локации // *Радиотехника и электроника*. – 1998. – Т. 43. – № 10. – С. 1157 – 1163.
  12. Быков В.В. Статистические характеристики центра излучения произвольного числа частично когерентных источников // *Радиотехника*. – 1997. – № 6. – С. 93 – 97.
  13. Леонтьев В.В., Виноградов В.А. Шумы радиолокационной цели, расположенной вблизи статистически шероховатой границы раздела двух сред // *Радиотехника и электроника*. – 1996. – Т. 41. – № 12. – С. 1471 – 1477.
  14. Плохих А.П., Комаров В.М. Бортовые моноимпульсные радиолокационные системы // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1993. – № 1. – С. 19 – 36.
  15. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
  16. Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики. – М.: Советское радио, 1970. – 120 с.
  17. Сухаревский О.И., Василец В.А., Сазонов А.З., Ткачук К.И. Расчет рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем объекте, частично покрытом радиопоглощающим материалом, с помощью триангуляционных кубатурных формул // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000. – Т. 5. – № 1. – С. 47 – 54.
  18. Бархударян Н.В., Важинский С.Э., Василец В.А., Сазонов А.З., Сухаревский О.И. Математическое моделирование процесса пеленгации в ближней зоне сложного протяженного объекта // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8 – № 2 – С. 86 – 93.
  19. Семенов А.А. Теория электромагнитных волн. – М.: Издательство Московского университета, 1968. – 320 с.
  20. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
  21. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 464 с.
  22. Первачёв С.В., Валуев А.А., Чиликин В.М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. – М.: Советское радио, 1973. – 488 с.

Поступила 14.05.2004

**ИВАНОВ Виктор Кузьмич**, заведующий отделом ИРЭ НАНУ, доктор физико-математических наук, в 1968 году окончил Харьковский политехнический институт. Область научных интересов – распространение электромагнитных волн в средах и дистанционное зондирование.

**БАРХУДАРЯН Николай Витальевич**, преподаватель кафедры ХВУ. В 1988 году окончил Киевское высшее зенитное ракетное инженерное училище им. С.М. Кирова, в 1999 году – факультет подготовки командно-штабного и руководящего инженерного состава ХВУ. Область научных интересов – радиофизика.

**САЗОНОВ Александр Захарович**, директор завода агрегатных станков. В 1985 году окончил МФТИ (Москва). Область научных интересов – математические методы в электродинамике.