

О проблемах разработки бистатической радиолокации земной поверхности

А.А. Калинин¹, М.С. Крылова¹, В.М. Масюк¹, В.Ю. Манаков²

¹Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН
103907, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7. e-mail: kalinkevich@newmail.ru

²ОАО Концерн радиостроения "Вега"
121170, Москва, Кутузовский проспект, 34

Представленная работа является продолжением развития создания двухпозиционной системы РЛС, предназначенной для обзора морской и земной поверхностей с неподвижных носителей. Не смотря на удовлетворительные результаты по моделированию работоспособности предлагаемой системы, возникают проблемы, связанные в первую очередь с вопросами моделирования отражения от поверхности. Работа сосредоточена в большей степени на разработке идеи, чем на технических характеристиках двухпозиционной системы РЛС, предназначенной для обзора морской и земной поверхностей с неподвижных носителей, включая воздушные шары

This presentation is a continuation of the development to ideas on creation of the bistatic radar for the observation sea surface and surfaces of the land from still platforms. Not review on satisfactory results on modeling of capacity to work of the proposed system, appear problems, bound in the first place with questions of modeling of the reflection from surface. Work concentrated in greater degree on development of the ideas, than on technical feature of the bistatic radar system for review sea and terrestrial surfaces with still platforms, including air balls.

Введение

Многоканальных радиолокационных комплексов с пространственным разнесением каналов (МПРЛС, ММО), в частности, бистатические комплексы подробно рассмотрены и давно используются на практике [1,2]. В основном рассмотрение ведется для решения задач по обнаружению объектов в воздушном пространстве. Для радиолокации предназначенной для обзора Земной поверхности характерным является как обнаружение отдельных целей, так и построение карт отражательной способности с некоторой разрешающей способностью. Наиболее часто рассматривают систему, когда передающая станция обладает узконаправленной, сканирующей антенной, а другие являются приемными станциями с малыми размерами апертур, т.е. имеют широкие диаграммы направленности антенн.

Представленный доклад касается вопросов возможности создания двухпозиционной РЛС для непрерывного обзора выбранного участка подстилающей поверхности с неподвижных носителей, включая возможность размещения их на малогабаритных аэростатах, с использованием не сканирующих малогабаритных антенн. В докладе основное внимание в большей степени уделяется вопросам рассмотрению идеи, чем техническим характеристикам РЛС. Рассмотрение ведется в предположении, что используются ШП или СШП сигналы, прием сигналов осуществляется в цифровом виде, работы двух РЛС строго синхронизированы. Предполагается, что антенны расположены на некоторой высоте от земли,

Основные принципы построения двухпозиционной системы.

Рассмотрению возможности создания такой системы было представлено в работе [3]. Пусть в точках O_1 и O_2 (рис.1а) расположены две радиолокационные станции работающие в импульсном режиме с длительностью импульса τ и имеющие

относительно широкие диаграммы направленности (ДНА). Одна из РЛС работает в режиме прием-передача, другая только на прием. Режим работы приемно-передающих станций может чередоваться. При излучении импульсного сигнала по поверхности будет распространяться «кольцо» с площадью S_1 от приемно-передающей станции, расположенной в т. O_1 , отражение от которого определяет принимаемый сигнал U_1 . Сигнал V_1 , который будет принимать РЛС, расположенная в т. O_2 , соответствует другой площади поверхности S_2 , это эллипсоидальное кольцо (см рис.1б,в). Сигналы от различных участков площадей S_1, S_2 случайны и независимы между собой, за исключением общей части.

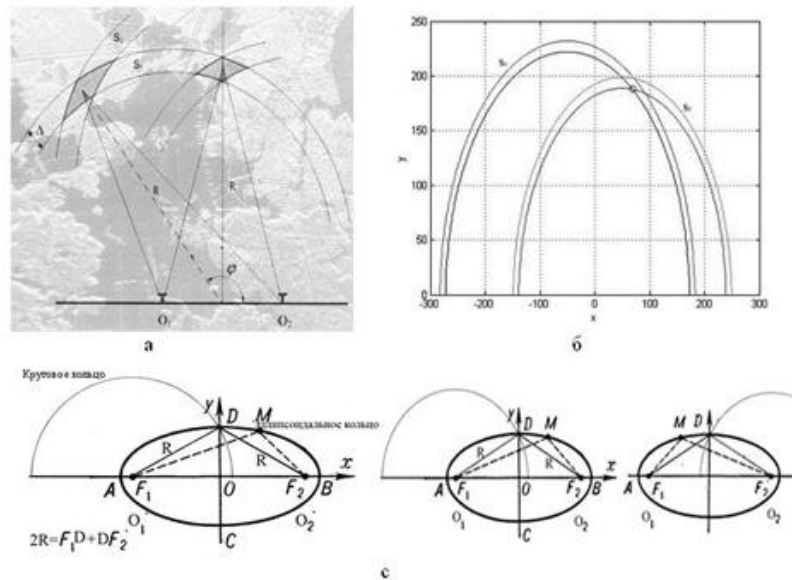


Рис.1. Формирование сигналов для двух РЛС при бистатической радиолокации
а) пересечение импульсов излучения происходит в области S ,
б) с учетом временных задержек излучения и приема импульсов в двух РЛС
можно осуществить сканирование по пространству,
с) при смене режимов работы этих станций $U_1 \neq U_2, V_1 \neq V_2$

Принимаемый сигнал $U_1(t)$ определяется распространяющимся по поверхности кольцом S_1 , в то время, как сигнал $V_1(t)$ - распространяющимся по поверхности, соответствующему эллипсоидальному кольцу S_2 . Время излучения и приема импульсов радиолокационных станций конструируется с учетом постоянных задержек, таким образом, что пересечение импульсов излучения происходит в области S , размер которой соответствует разрешающей способности ΔS . В соответствии с цифровым приемом и с учетом временных задержек излучения и приема импульсов в двух РЛС можно осуществить сканирование по пространству (рис.1б), которое определяется ДНА. Режимы работы этих станций поочередно могут меняться. При изменении функций работы этих двух РЛС области облучения поверхности, за исключением общей зоны пересечения, меняются, $U_1 \neq U_2, V_1 \neq V_2$ т.е., сигналы не являются взаимнообратимыми.

О вопросе выделения сигнала, соответствующего общей части O .

При рассмотрении построения такой бистатической системы делается, на первый взгляд, «абсурдная» попытка - выделить отражение, соответствующее общей зоне пересечения двух областей (полосок) S_1 и S_2 . Сигналы U и V в каждый момент времени соответствуют отражениям от площадей S_1 и S_2 , в каждой из которых находится много точек отражения, наша же цель выделить сигналы, соответствующие только общей части O площади пересечения, в которой также находится достаточно много точек отражения. Конечно, при суммировании, перемножении сигналов роль общего элемента по сравнению с другими областями выделяется, но на фоне других элементов отражения роль может оказаться крайне малой. Это возможно только для случая обнаружения объекта в воздушном пространстве.

Дальнейшее рассмотрение отчасти связано с некоторыми элементами работы РСА. При работе импульсной РСА в каждый момент времени также принимается сигнал, соответствующий большой полосе облучения, в котором находится много объектов с различными отражательными свойствами рис.2. При пролете сигнал непрерывно меняется примерно со временем пролета размера антенны РСА в азимутальном направлении. В теории работоспособности РСА вопросы формирования суммарного сигнала не рассматриваются. Как правило, выбирается элемент отражения Z (считают, что это точечное тело, хотя реально оно состоит из множества отдельных отражателей), ему приписывают некоторое значение отражающей способности K и считают, что от угла наблюдения при пролете над ним его отражательные свойства не меняются. На этом этапе размер этого элемента по азимуту не рассматривается. Следует отметить, что ряд авторов, см.на пример[4], указывают на то, что такой подход не совсем точен, что надо учитывать особенности поверхности по азимуту, при этом корреляционная опора при обработке должна быть другой и можно получить более высокое разрешение по азимуту. В силу того, что корреляционные свойства поверхности неизвестны, в качестве опорной функции все же используется опорная, соответствующая точечной цели. При пролете над элементом облучения фаза отраженного сигнала от элемента отражения Z меняется по определенному закону, а амплитуда обратного отражения полагается остается постоянной, а если меняется, то незначительно. Зависимость изменения фазы отраженного от элемента отражения Z вычисляется, зная параметры движения носителя. Таким образом, можно рассчитать опорную функцию для осуществления корреляционной обработки. В зависимости, как происходит обработка, определяется азимутальный размер элемента Z . Основным является то, что до последнего этапа сигнал рассматривается в комплексном формате. Комплексная форма сигнала предполагает, что среднее значение передающего и принимаемого сигналов равно нулю.

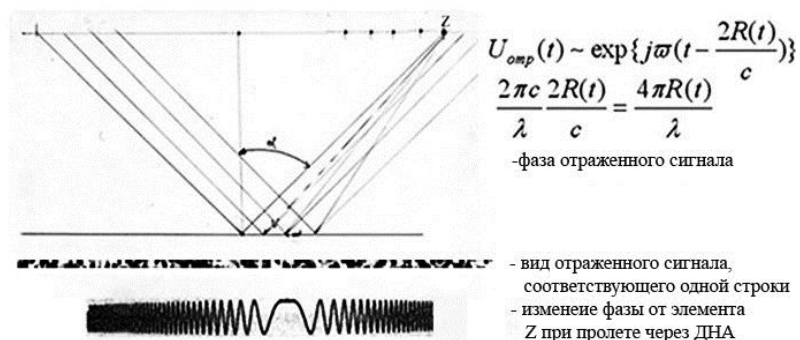


Рис. 2. Формирование первичного сигнала одной строки радиолокационного изображения. Ориентировочный вид сигнала, принимаемого по строке. Сигнал двуполярный: - темному цвету соответствует отрицательное значение, - светлому цвету соответствует положительное значение

В практической реализации формирование радиолокационных изображений РСА, как правило, не используется метод прямой корреляционной обработки, а основывается на формировании реальной и мнимой компонент изображения [5], и только после некоторой обработки их РЛИ представляется в удобном для нас формате (см. рис.3). В комплексных компонентах совершенно практически невозможно увидеть какую-либо информацию. Это происходит из-за того, что в таком формате различные цели отделены друг от друга вариациями дисперсии. Природа ввела в нашу визуальную систему способность (зрение) способность отделять различные объекты посредством их яркостных или цветовых свойств. Биологический отбор не знал, что человечество, в конечном счете, столкнется с формированием радиолокационных систем типа РСА [6]. Если имеются области с резкими изменениями отражательной способности, то очертания этих неоднородностей проявляются на комплексных изображениях рис.3б

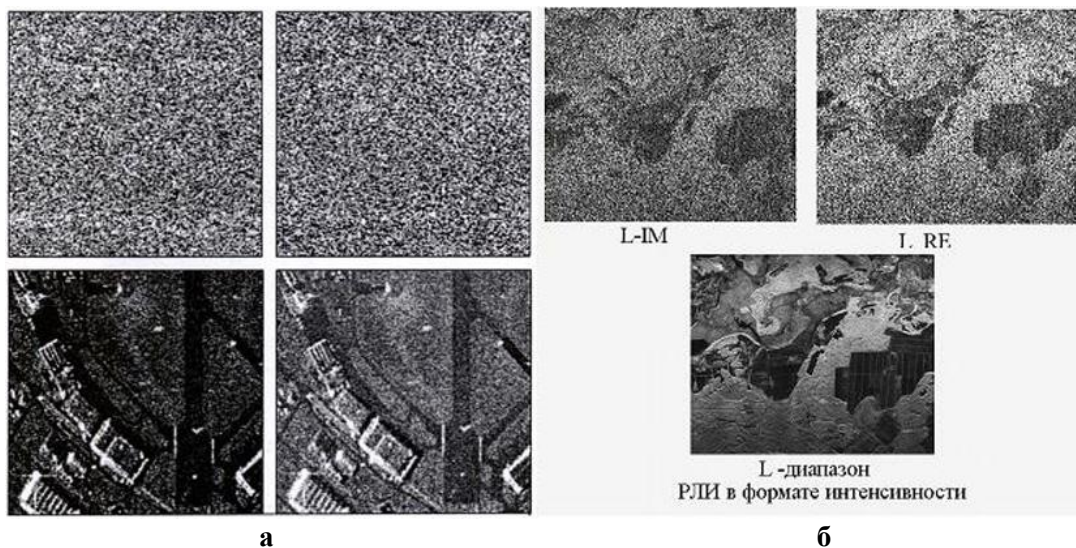


Рис.3. Реальное и мнимое изображения РСА, изображение РСА в формате интенсивности и амплитуды: а) из работы [6]; б) полученное в наших экспериментах.

Следующая особенность состоит в том, что при рассмотрении радиолокационного изображения визуально можно выделить однородные области, соответствующие одному типу поверхности см. рис.4 , на которых можно выбрать отдельные участки, на пример, M,L, Q,G, но значение коэффициента корреляции между ними близко к нулю.



Рис.4. Выбор отдельных участков поверхности для однотипных областей поверхности

Показателем того, что эти участки относятся к одному типу поверхности, определяется дисперсиями участков L и M, Q и G.

В случае задачи бистатической радиолокации анализ показывает, что выделить сигнал, по одной реализации, соответствующей зоне пересечения двух колец, невозможно. Требуется выполнить усреднение. Поэтому было предложено [3] использовать несколько областей пересечений, т.е. рассмотреть следующий вариант схемы рис.5, при котором разрешающая способность уменьшается.

Однако и в этом случае невозможно выделение сигнала соответствующего общей зоне пересечений, используя сигналы U_1 и V_1 в формате интенсивности или амплитуды. Так же как в РСА, операции по регистрации и обработке сигналов U_1 и V_1 на первом этапе полагается, что они являются комплексными величинами со средним значением равным нулю.

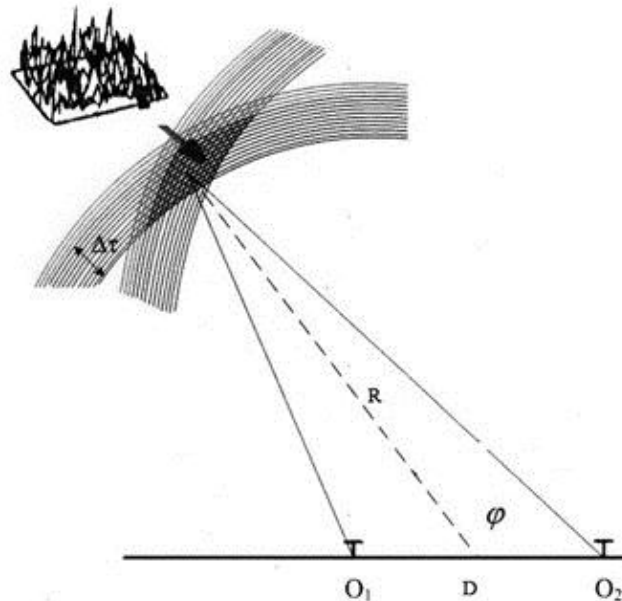


Рис.5. Схема измерения

Первоочередной задачей (при рассмотрении формирования изображения в РСА такая проблема не рассматривается) является, как выполнить моделирование формирования сигнала от полосы облучения, т.е. как разбить полосу облучения на отдельные элементы (в облучаемую зону попадают совершенно различные объекты); б) как выполнить моделирования сигналов на выбранных элементах. Рис.6

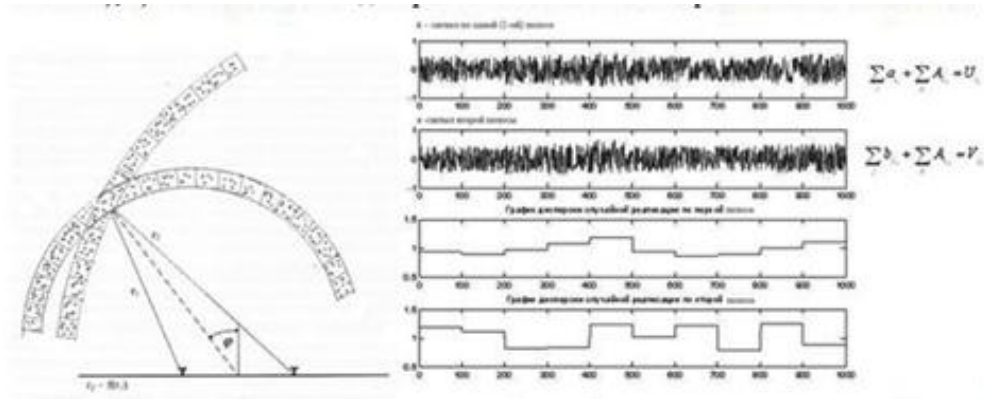


Рис.6. Вид одной реализации сигналов (а и в) и дисперсии по полосам (на участке 400-500 сигналы и дисперсии в обеих полосах одинаковы).

Не смотря на то, что длины сигналов на представленном графике одинаковы, как оказалось это не имеет значение.

Реально на входах приемников мы имеем U_{i_n} и V_{k_n} . При моделировании предложено: а) полосы облучения разбивать произвольно на некоторое число подзон, б) сигналы в каждой из них моделировать случайно с нормальным распределением, в) каждом этапе моделирования дисперсию сигнала в каждом элементе моделировать также случайным образом, г) сигналы в общей области, несмотря на случайный характер, приравнивались друг другу рис.6.

Алгоритм обработки для выделения отражения от выбранного участка поверхности

При соответствующих временных задержках на входах приемников мы имеем две комплексных величины $U_{i_n} = \sum_i a_{i_n} + \sum_k A_{k_n}$ и $V_{j_n} = \sum_j b_{j_n} + \sum_k A_{k_n}$, где $\sum_k A_{k_n}$ отражение от n точек в зоне пересечения. Из этих двух величин возможно получить несколько комбинации $U_{i_n} + V_{j_n}$ и $U_{i_n} - V_{j_n}$ и выполнить усреднение по n (число попарных пересечений круговых и эллиптических колец) рис.6 (б,в,г). Однако выделить сигнал, соответствующий зоне совместных пересечений не удастся.

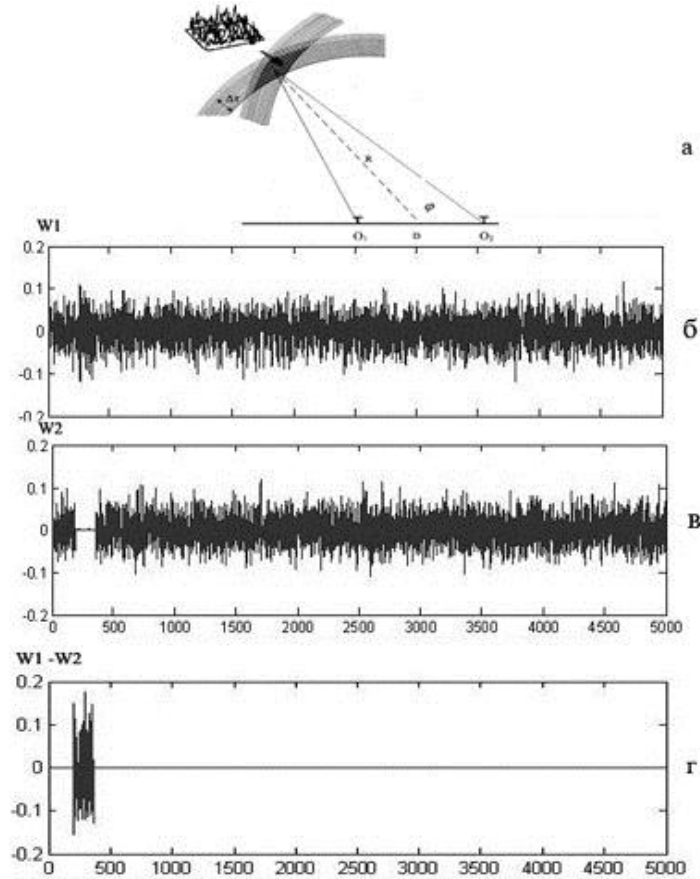


Рис.8. Некоторые результаты моделирования выделения сигнала для общей части **О**
а) схема разбиения элемента разрешения; **б)** сигнал сумм сигналов (W_1) по $l=160$
экспериментам для попарных сумм; **в)** сигнал сумм сигналов (W_2) по 160 экспериментам
для попарных разностей; **г)** сигнал разности $W_1 - W_2 = 2\sum_k A_{k_n} + 2\sum_j b_{j_n}$.

Моделирование показало, что величина $2\sum_j b_{j_n}$ мала, но при вычислении дисперсии сигнала $W_1 - W_2$ влияние ее наблюдается. Было предложено представить алгоритм в следующем виде. В результате измерений получаем ряд величин U_{i_n}, V_{j_n} .

$$U_{i_n} + V_{j_n} = \sum_i a_{i_n} + 2\sum_k A_{k_n} + \sum_j b_{j_n}, \quad U_{i_n} - V_{j_n} = \sum_i a_{i_n} - \sum_j b_{j_n}$$

Так как средние значения $\overline{U_{i_n}} = \overline{V_{j_n}} = \overline{U_{i_n} + V_{j_n}} = \overline{U_{i_n} - V_{j_n}} = 0$, то

$$\begin{aligned} \overline{(U_{i_n} + V_{j_n})^2} &= \overline{(\sum_i a_{i_n})^2 + 4(\sum_k A_{k_n})^2 + (\sum_j b_{j_n})^2 + 4\sum_i a_{i_n} \sum_k A_{k_n} + 2\sum_i a_{i_n} \sum_j b_{j_n} + 4\sum_i b_{i_n} \sum_k A_{k_n}} = \\ &= \overline{(\sum_i a_{i_n})^2 + 4(\sum_k A_{k_n})^2 + (\sum_j b_{j_n})^2}, \dots \text{так как} \dots 4\sum_i a_{i_n} \sum_k A_{k_n} = 0, \dots 2\sum_i a_{i_n} \sum_j b_{j_n} = 0, \\ &4\sum_i b_{i_n} \sum_k A_{k_n} = 0. \text{усреднение} \dots \text{происходит} \dots \text{по} \dots n \end{aligned}$$

$$\overline{(U_{i_n} - V_{j_n})^2} = \overline{(\sum_i a_{j_n})^2} + \overline{(\sum_j b_{j_n})^2} \text{ В результате имеем } \overline{4(\sum_k A_{k_n})^2}$$

Таким образом, удастся найти дисперсию сигнала выбранного участка поверхности. Остается только выполнить моделирование случайных величин a_{i_n} , b_{j_n} , A_{k_n} . Приведенные ниже результаты моделирования соответствуют случаю, когда облучаемые полосы были разделены на 10 участков. На каждом участке случайные отраженные сигналы a_{i_n} , b_{j_n} , A_{k_n} соответствовали нормальному закону, дисперсия сигналов на каждом участке моделировалась также по случайному нормальному закону, максимальное количество попарных пересечений взято 120. Средним значением дисперсии на всем участке принимается за 1. К общему сигналу по всей полосе подмешивался шум- случайный сигнал с дисперсией, соответствующей -3дБ, -6дБ, -50дБ. Кроме того, при моделировании сигналов для каждой новой пары полос "n" дисперсия могла случайно меняться в пределах +/-20% (это не относилось для общего участка пересечения). На приведенных ниже результатах моделирования обозначения типа **3Дб+диспер**. Означает, что додавлен равномерный по всему участку шум с отношением сигнал шум -3дБ и дисперсия сигналов на каждом участке от одной реализации к другой менялась случайным образом в пределах +/-20%. При расчетах дисперсия на общем участке дисперсия приравнивалась к 1,1. Некоторые результатом моделирования приведены ниже рис.9. На рис.9 представлены зависимости средней дисперсии $\overline{4(\sum_k A_{k_n})^2}$ и ее относительной ошибки измерения от числа попарных пересечений (**n**).

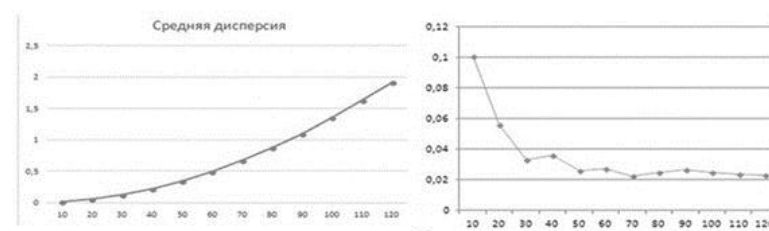
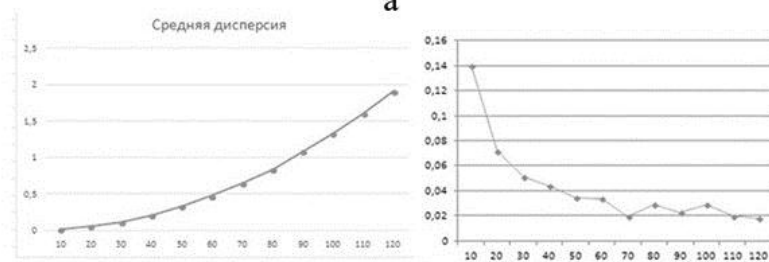
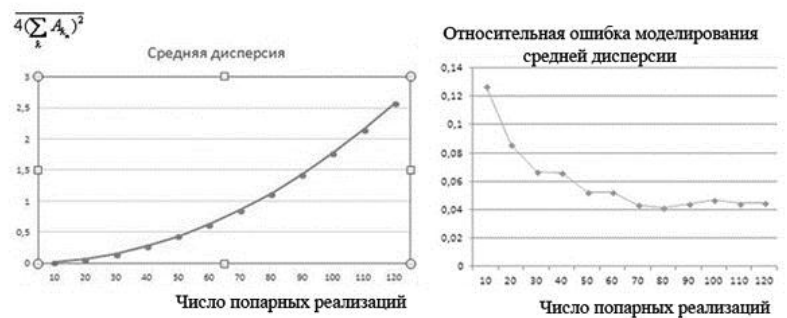


Рис.9. Зависимости средней дисперсии и ее относительной ошибки измерения от числа попарных пересечений n
а – для случая 3дБ+дисп., б – для случая бдБ+дисп.,
в – для случая 60дБ

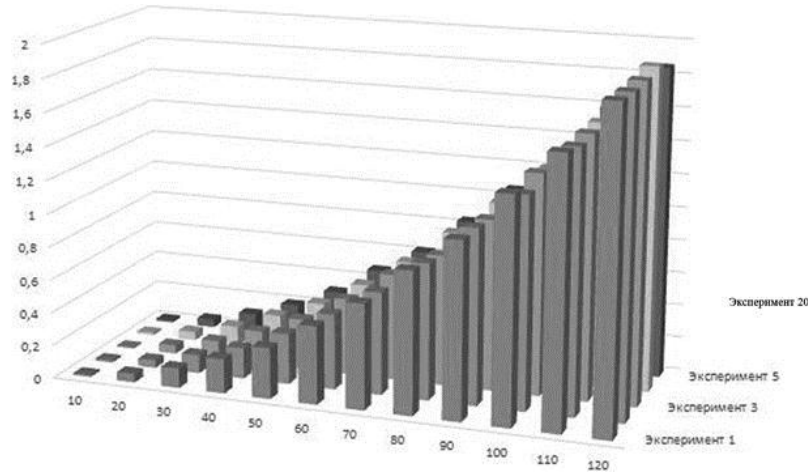


Рис.10. Зависимости средней дисперсии от числа попарных пересечений N для 20 экспериментов

В качестве регрессионной кривой результатов моделирования от числа областей пересечения n была взята кривая 2-ого порядка $y = ax^2$ (парабола). Отклонения значений регрессии кривой от результатов моделирования может быть связана с тем, что мы неправильно выбрали уравнение регрессии, а также с ошибками моделирования, которые связаны со случайностью формирования сигналов отражения a_i и b_j и их дисперсий. Для проверки гипотезы $y = ax^2$ использовался критерий Фишера о равенстве двух (множества) генеральных совокупностей, распределенных по нормальному закону применяется критерий Фишера. Для этого операция определения зависимости средней дисперсии и от числа попарных пересечений n повторялась 20 раз. Результаты вычисления приведены на рис.10. Параметром критерия Фишера

$$F = \frac{\sigma_{\text{факт}}^2}{\sigma_{\text{ост}}^2}, \text{ где } \sigma_i^2 \text{ определяются согласно Таблице 1}$$

Таблица 1. Вычисление общей, факторной, остаточной дисперсий

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия на одну степень свободы
Общая	$\sum (y - \bar{y})^2$	$n - 1$	$S_{\text{общ}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1}$
Факторная	$\sum (\hat{y}_x - \bar{y})^2$	m	$S_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum (\hat{y}_x - \bar{y})^2}{m}$
Остаточная	$\sum (y - \hat{y}_x)^2$	$n - m - 1$	$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n - m - 1}$

Критерий Фишера [7,8] - сопоставление факторной и остаточной дисперсии, который устанавливает влияние неучтенных в модели факторов. Значение F (в нашем

случае $F=1786$) сравнивается с табличным $F_{табл}(\alpha; k_1; k_2)$ при уровне достоверности α и степенях свободы $k_1 = m = 1$ и $k_2 = n - m - 1 = N - 2$. Для $N=20$ экспериментов табличное значение Критерия Фишера составляет 4,35 при достоверности 0,05 (95%). Наше значение больше табличного, что дает нам возможность говорить о том, что дисперсия сигнала (интенсивность сигнала) в зависимости от числа n возрастает квадратично, т.е. значение интенсивности сигнала увеличивается пропорционально площади, с которой он принимается. Зависимость относительной ошибки моделирования средней дисперсии в результате повторения экспериментов (моделирования) $N=20$ раз от числа попарных пересечений n представлена на рис.10.

Выводы

Моделирование процесса выделения сигнала, соответствующего общей площади двух перекрывающихся колец для земной поверхности с неподвижных носителей, включая малоразмерные аэростаты, дали обнадеживающиеся результаты. Однако основная сложность заключается в моделировании сигналов, отраженных от разнородных площадей S_1 и S_2 и разработки методик выделения сигнала, соответствующего элементу разрешения. Поэтому приведенные результаты нельзя признать завершенными, а следует рассматривать их предварительными, которые служат скорее отправной точкой для дальнейших исследований, чем материалом для окончательных выводов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант №13-02-12065

Литература

1. Чапурский В.В.. Мультипликативная обработка сигналов с подавлением отражений от местных предметов в задачах сверхширокополосной ММО-локации, Успехи современной радиоэлектроники, 1-2, 2009, стр. 114-122
2. Черняк. В.С.О новых и старых идеях в радиолокации: ММО РЛС. Успехи современной радиоэлектроники 2, 2011, стр. 5-20.
3. Калинин А.А., в.н.с., к.ф.-м.н, с.н.с., н.с., Крылова М.С., Масюк В.М., н.с, к.ф.-м.н. , Тамонов Д.В. Об особенностях моделирования работы бистатической (многопозиционной) радиолокации для обзора воздушного пространства, морской и земной поверхности с неподвижных носителей, Материалы VI Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» Муром, 27-29 мая 2014, ISSN 2304-0297, pp.163-167.
4. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях, под редакцией В.Ф.Кравченко, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2007
5. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э., Радиолокационные системы землеобзора космического базирования, Изд. «Радиотехника», Москва 2010
6. Frery A.C., Freitas C.C., Santanna S.J.S., Renno C.D., Statistical Properties of SAR Data and their Consequences, Seminar of the United Nations Programme on Space Applications, 10:53-62,1999
7. Кобзарь А.И.. «Прикладная статистика», М.Физматлит, 2006.
8. Учебное пособие «Эконометрика» составители А.К.Шалабанов, Д.А.Роганов, Академия управления «ТИСБИ», 2008г.Казань