

О возможности использования бистатической радиолокации на геостационарной орбите для мониторинга АЗРФ

А.А.Калинкевич, В.М.Масюк

Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН, 103907, Москва, ул. Моховая, 11. корп.7. тел.: +7(495) 629-33-65, Факс: +7(495) 629-36-78, E-mail: kalinkevich@newmail.ru

On the possibility of using bistatic radar in geostationary orbit to monitor the Russian Arctic

A.Kalinkevich, V.Masyuk

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences Russian Federation, RF Moscow, 125009, Mokhovaya st., 11/7

В [1,2] была предложена схема бистатической радиолокационной системы для наблюдения поверхности земли с двух неподвижных пунктов наблюдения. Статьи были сосредоточены на идеях, чем на решении технических проблемах, и формировались на основе электромагнитных сигналов комплексных по своей природе. В настоящей работе рассматривается вопрос о возможности использования результатов работ [1,2] для решения проблем мониторинга Арктической зоны РФ с геостационарной орбиты.

In [1,2], a bistatic radar scheme was proposed for observing the earth's surface from two fixed observation points. The articles were more focused on ideas than on solving technical problems, and were formed on the basis of electromagnetic signals complex in nature. In the present work we consider the possibility of using the results of [1,2] for the solution of problems of monitoring of the Arctic zone of the Russian Federation from the geostationary orbit.

Введение

Наиболее перспективным методом для мониторинга Арктической зоны РФ (АЗРФ) является применение радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА). Основным недостатком применение РСА является отсутствие возможной оперативности получения информации (конкретно в данный момент). Космические радиолокационные средства позволяют получать информацию с интересующего района не чаще, чем 1-2 раза в сутки, что, в частности, не обеспечивает необходимой оперативности обнаружения и принятия решений в случаях ЧС.

В [1,2] была предложена бистатическая радиолокационная схема для наблюдения поверхности земли с двух неподвижных пунктов наблюдения. Статьи были более сосредоточены на идеях, чем на решении технических проблемах, и формировались на основе электромагнитных сигналов комплексных по своей природе. В настоящей работе рассматривается вопрос о возможности использования результатов работ [1,2] для решения проблем мониторинга Арктической зоны РФ с геостационарной орбиты.

Требования к радиолокационной аппаратуре

Радиус геостационарной орбиты от поверхности Земли составляет ~35000 км. Недостатки геостационарной орбит: а) невозможность наблюдения поверхности Земли в высоких широтах из-за сферичности Земли (рис.1а). На геостационарной орбите не наблюдается поверхность Земли с широт (приблизительно от 79° - 81° до полюсов), а на широтах выше 75° поверхность наблюдается очень низко над горизонтом (в реальных условиях часть поверхности скрывается выступающими объектами и рельефом местности). Таким образом, область наблюдения Арктической зоны с геостационарной

орбиты с Севера ограничена широтой $\sim 70^{\circ}$ - 75° , с южной стороны широтой 66° . При этом диапазон наблюдения выбранной зоны по широте зоны составляет $\Delta\theta \approx 0,12^{\circ}$. Этот диапазон углов соответствует $\Delta R \approx 550\text{км}$. Арктическая зона РФ по долготе определяется 30° в.д. – 170° з.д. (что соответствует углу наблюдения со спутника $\Delta\varphi = 6,2^{\circ}$, рис.1б).

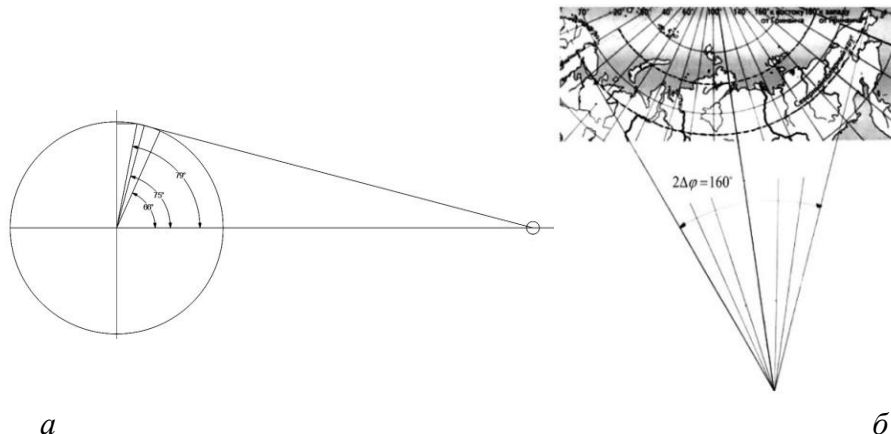


Рис.1. Арктическая зона Российской Федерации. а) ограничение наблюдения АЗРФ с геостационарного спутника; б) АЗРФ ограничена Северным полярным кругом на уровне 66° с.ш., по долготе в интервале 33° в.д. , 170° з.д.

Географический центр АЗРФ зоны России находится на территории Красноярского края в районе 110° в.д., у юго-восточного берега озера Виви. Раскрыв зоны наблюдения в азимутальной плоскости в $\Delta\varphi = 6,2^{\circ}$ (Рис.1б) соответствует диапазону по расстоянию $\Delta L \approx 3900\text{км}$. (по окружности 5501км). Таким образом, необходимо наблюдать территорию более 3000 км^2 . При использовании РСА с полосой обзора 200 км и временем одного витка 2 часа для снятия всей территории потребуются более двух суток. Величина ДНА антенны определяется $\phi = \lambda/D$, где D - размер апертуры антенны, λ - длина волны электромагнитного излучения. С учетом частых туманов, снежных бурь, дождей целесообразно выбрать диапазоны С ($\lambda = 10\text{см}$.) (в диапазоне С разрешенный частотный диапазон более широкий, чем в L). Для бистатического метода (будет показано ниже) необходимо использовать широкополосные и сверхширокополосные сигналы. По вертикали угол обзора $0,12^{\circ}$. Что соответствует размеру апертуре антенны $D_1 = 50\text{м}$., по азимуту угол обзора $6,2^{\circ}$, а $D_2 = 1\text{м}$. Разрешающая способность по дальности определяется эффективной длительностью зондирующего сигнала. Реально можно разместить на орбите антенну размером 100м . При этом разрешающая способность по азимуту будет $\Delta l = R \frac{\lambda}{D} = 35\text{км}$. Однако для решения задач мониторинга АЗРФ требуется разрешение порядка нескольких десятков метров. Поэтому разрабатывать РЛС со сканирующим узконаправленным лучом в секторе 6° не имеет смысла.

Основные принципы построения двухпозиционной системы

Рассмотрение ведется в предположении, что используются ШП или СШП сигналы, прием сигналов осуществляется в цифровом виде, работы двух РЛС строго синхронизированы.

Пусть в точках O_1 и O_2 (рис.2а) расположены две РЛС на геостационарной орбите, расстояние между которыми порядка 6000 км ., работающие в импульсном режиме, имеющие диаграммы направленности $0,12^{\circ}$ и 6° по дальности и по азимуту,

сориентированные в Географический центр Арктической зоны России. Одна из РЛС работает в режиме прием-передача, другая только на прием. Режимы работы станций чередуются. При излучении импульсного сигнала по поверхности будет распространяться «кольцо» с площадью S_1 от приемо-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.2б). Сигналы от различных участков площадей S_1, S_2 случайны и независимы между собой, за исключением общей части.

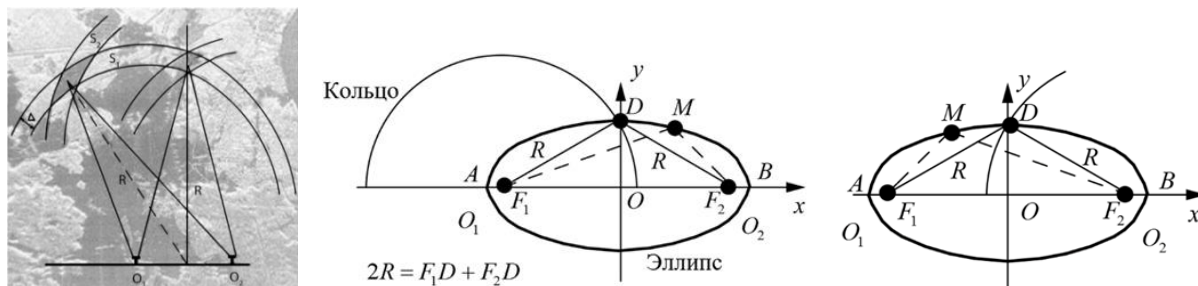


Рис.2. Формирование сигналов для двух РЛС при бистатической радиолокации
а) к пояснению принципа пересечения импульсов излучения в области S , Δ - ширина «полосы», связанная с учетом временных задержек при сканировании,
б) к учету задержек излучения и приема импульсов в двух РЛС для осуществления сканирования по пространству при смене режимов работы этих станций $U_1 \neq U_2, V_1 \neq V_2$

Сигнал V_1 , который будет принимать РЛС, расположенная в т. O_2 , соответствует другой площади поверхности S_2 , это эллипсоидальное кольцо. Сигналы от различных участков площадей S_1, S_2 случайны и независимы между собой, за исключением общей части. Время излучения и приема импульсов РЛС конструируется с учетом постоянных задержек, таким образом, что пересечение импульсов излучения происходит в области S . В соответствии с цифровым приемом и с учетом временных задержек излучения и приема импульсов в двух РЛС можно осуществить сканирование по пространству, которое определяется ДНА. Режимы работы этих станций поочередно могут меняться. Сигналы от различных участков площадей случайны и независимы между собой, за исключением общей части.

О вопросе выделения сигнала, соответствующего общей части

При рассмотрении построения такой бистатической системы делается, на первый взгляд, «абсурдная» попытка - выделить отражение, соответствующее общей зоне пересечения двух областей (полос) 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.

Наше дальнейшее рассмотрение отчасти связано с элементами работы РСА. Рассмотрим некоторые моменты в работе 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. 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 (как правило, 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 его отражательные свойства не меняются. На этом этапе размер этого элемента по азимуту не рассматривается.

При использовании РСА радиолокационное изображение состоит из реальной и мнимой компонент изображения, которые не несут никакой информации [3], и только после некоторой обработки оно представляется в удобном для нас формате (см. рис. 3). Конечно, когда имеются области с резкими изменениями отражательной способности, то очертания этих неоднородностей проявляются на комплексных изображениях рис. 3б.

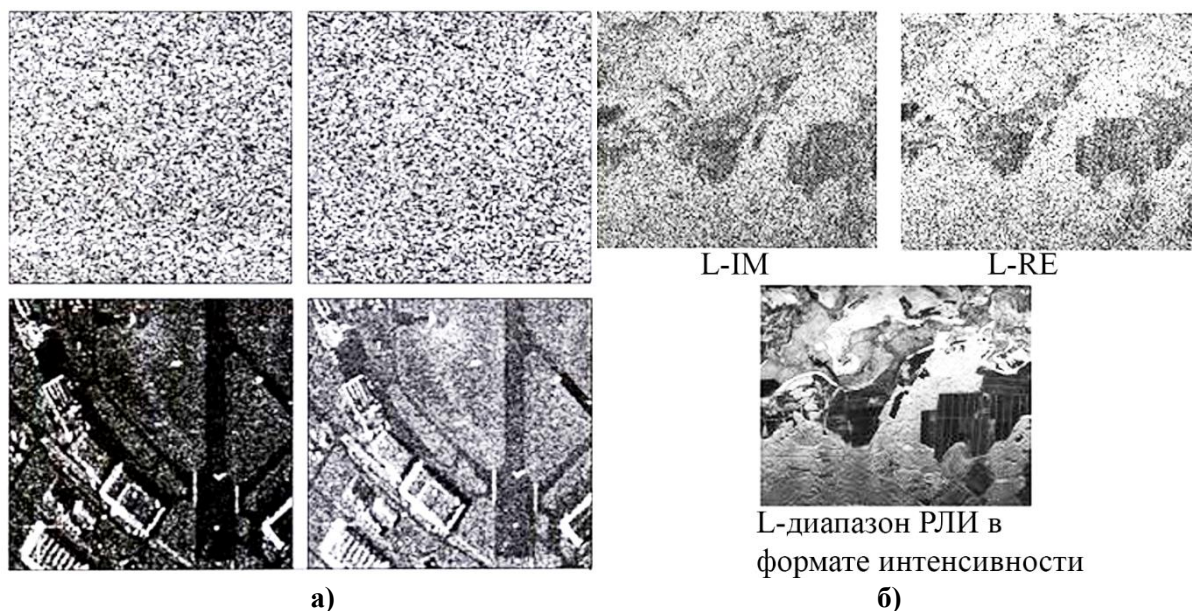


Рисунок 3. Реальное и мнимое изображения РСА, изображение РСА в формате интенсивности и амплитуды: а) из работы [3]; б) полученные в наших экспериментах.



Рисунок 4. Выбор отдельных участков поверхности с однотипными областями.

При рассмотрении радиолокационного изображения визуально можно выделить однородные области, соответствующие одному типу поверхности, см. рис. 4, на

которых можно выбрать отдельные участки, но значения коэффициента корреляции между ними будут равны нулю. Показателем того, что эти участки относятся к одному типу поверхности, определяется дисперсиями этих участков.

Выводы. Анализ показывает, что попытка выделить сигнал, соответствующей зоне пересечения двух колец, используя сигналы U_1 и V_1 в формате интенсивности или амплитуды, невозможна. Таким образом, операции по регистрации и обработке сигналов U_1 и V_1 должны предполагать, что мы имеем дело с комплексными величинами со средним значением равным нулю.

К вопросу выделения сигнала, соответствующего общей части

Первоочередной задачей является, как выполнить моделирование формирования сигнала от полосы облучения т.е.: а) как разбить полосу облучения на отдельные элементы (в облучаемую зону попадают совершенно различные объекты); б) как выполнить моделирования сигналов на выбранных элементах; в) доказать, что сигнал при отражении на трассе $O_1 \rightarrow \Delta S \rightarrow O_2$ коррелируется с сигналом на трассе $O_2 \rightarrow \Delta S \rightarrow O_1$; г) показать, что имеется возможность выделить сигнал, соответствующий элементу ΔS .

В данной работе приведен первоначальный анализ и указаны исходные данные для моделирования процесса выделения сигнала, который соответствует общей площади двух перекрывающихся колец для земной поверхности с двух геостационарных спутников. Основная трудность заключается в моделировании сигналов, отраженных от разнородных площадей S_1 и S_2 и разработке методик выделения сигнала, соответствующего элементу разрешения, т.е. пункты в и г являются основополагающими.

Первоначально покажем, что сигналы U_{10} и V_{10} могут при определенных условиях быть коррелируемые.

Рассмотрим элементы работы РСА: в каждый момент времени принимается сигнал, соответствующий большой полосе облучения, в котором находится много объектов с различными отражательными свойствами. При пролете угол наблюдения малого элемента поверхности меняется в пределах ДНА ($\Delta\varphi_{\text{дна}}$), который определяет разрешающую способность по азимуту. РСА может работать в детальном прожекторном режиме, когда осуществляется поворот антенны в пределах $2\Delta\varphi_{\text{повор}}$ для отслеживания участка поверхности (см. рис 5). При этом элемент поверхности будет наблюдаться в пределах $\varphi = \Delta\varphi_{\text{дна}} + 2\Delta\varphi_{\text{повор}}$. Для «Кондор-Э» [4] угол $\varphi \sim 5^\circ - 6^\circ$, т.е. в пределах 6° возможна когерентная обработка.

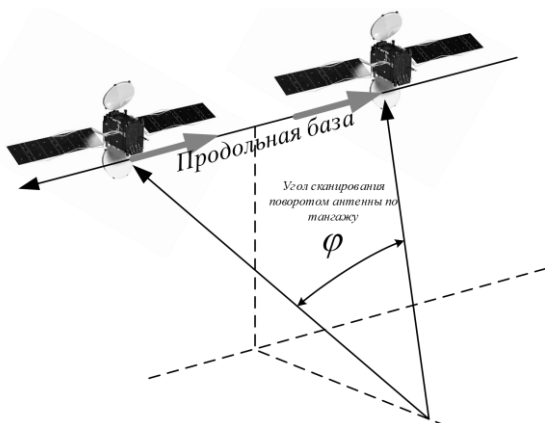


Рис.5. Когерентная обработка сигнала

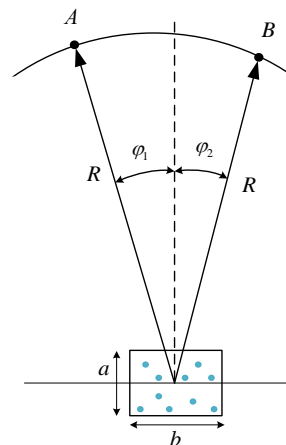


Рис.6. Геометрия для моделирования

При этом разрешающая способность РСА по азимуту увеличивается (определяется углом φ). При этом задавая угол φ , автоматически определяется разрешающая РСА. В предлагаемой бистатической системе ситуация для рассмотрения более сложная. Элемент разрешения зависит как от эффективной длительности зондирующего сигнала, так и от величины угла, под которым наблюдается элемент поверхности с двух РЛС. Чем больше угол, тем лучше разрешающая способность по азимуту. Одновременно с этим ухудшается когерентность между сигналами U_{10} и V_{10} . Таким образом, для каждого конкретного случая приходится определять условия для работоспособности бистатической системы. Для обоснования возможной когерентности сигналов для двух РЛС было выполнено предварительное моделирование. В основу моделирования положена следующая геометрия(см. рис.6).

В точках А и В геостационарной орбиты расположены радиолокационные устройства, Элемент разрешения на поверхности $\Delta S = a \cdot b$. На данном элементе случайно располагались N точек, задавался угол $-3^\circ \leq \varphi_1 \leq 3^\circ$, для каждого значения угла φ_1 были рассчитаны зависимости сигнала и фазы отраженных сигналов в т.В и в т.А, от значения угла φ_2 . Операция повторялась неоднократно при изменении выбора случайно расположенных T точек. В качестве примера на рис. 7. приведены зависимости нормированной амплитуды сигнала и фазы сигналов в т.В. Приведенные зависимости показывают, что в пределах углов $-3^\circ \leq \varphi_2 \leq 6^\circ$ сигналы в т.В и в т.А коррелируемы.

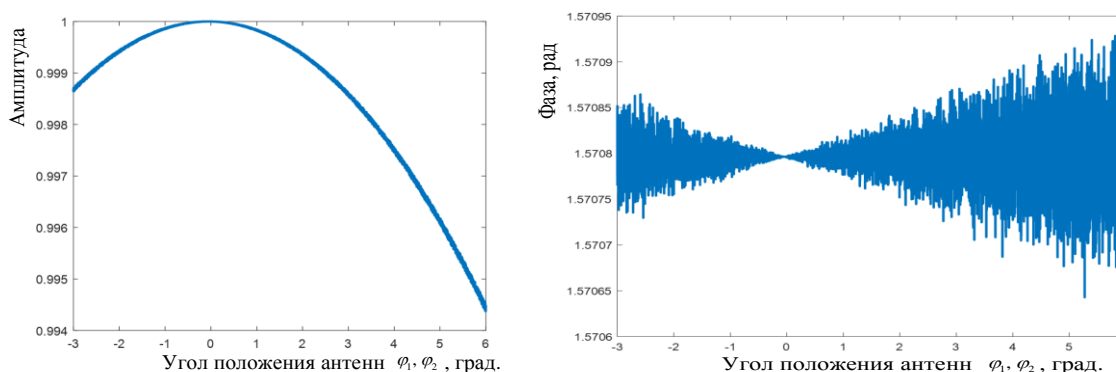


Рис.7. Результаты моделирования амплитуды и фазы сигнала в т.В

Выводы

Результаты моделирования показали, что размеры **a** и **b** сильно сказываются на угол когерентности $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. Для случая расположения пунктов расположения радиолокационных станций на расстоянии 6000км, и использования полосы сигналов 100-200 МГц., когерентность сигналов сохраняется для того чтобы охватить большую часть зоны АЗРФ.

При выполнении моделирования формирования отраженного сигнала каждую полосу облучения разбивали на отдельные элементы (в облучаемую зону попадают совершенно различные объекты), см. рис.8, каждый участок моделировался n (400-500) независимыми точками. Предложено моделировать сигналы на каждом элементе нормальным распределением. Дисперсия в каждом элементе моделировалась случайным образом на каждом этапе моделирования. Сигналы в общей области, несмотря на случайный характер, равнялись друг другу.

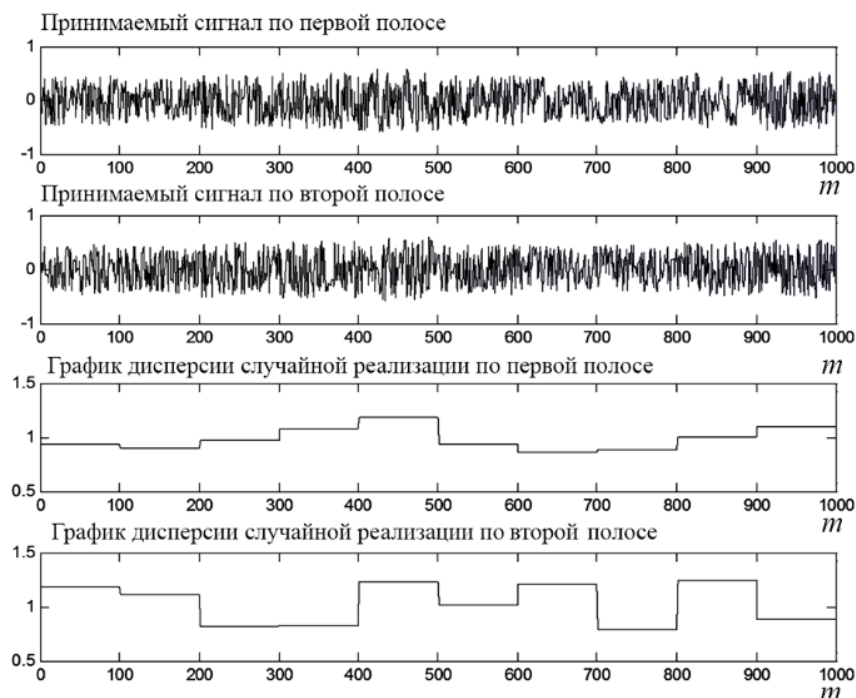


Рис. 8. Пример моделирования принимаемых сигналов и их дисперсий по полосам

Несмотря на то, что длины сигналов на представленном графике одинаковы, на результате это не сказывалось. Реально на входах приемников мы имеем сигналы, соответствующие полосам облучения:

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

Здесь a_{i_n} - комплексный сигнал на участке n полосы S_1 , b_{j_n} - комплексный сигнал на участке n полосы S_2 , A_{k_n} - сигналы в общей области.

Алгоритм обработки для выделения отражения от выбранного участка поверхности

При соответствующих временных задержках на входах приемниках мы имеем две комплексные величины:

$$U_1 = \sum_i a_{i_1} + \sum_k A_{k_1}, V_1 = \sum_j b_{j_1} + \sum_k A_{k_1}$$

Из этих двух величин возможно получить комбинации $U_{i_1} + V_{j_1}$ и $U_{i_1} - V_{j_1}$. Но все попытки моделирования показали, что выделить величину $\sum_k A_{k_1}$ по одной реализации не удастся. Требуется выполнить усреднение. Поэтому было предложено рассмотреть следующий вариант схемы, при котором разрешающая способность уменьшается.

Параметр n определяет число попарных пересечения круговой и эллиптической колец или пересечение круговой из т. O_1 и круговой из т. O_2 . В результате алгоритм представлен в следующем виде. В результате измерений получаем ряд величин U_{i_n} , V_{j_n} , обладающих свойствами:

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

$$U_{i_n} - V_{j_n} = \sum_i a_{i_n} - \sum_j b_{j_n}. \quad (3)$$

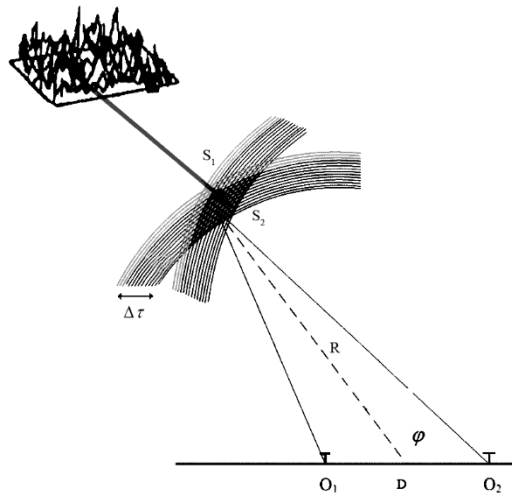


Рис. 9. Разбиение полосы облучения $\Delta\tau$ на отдельные элементы в зоне пересечения S_1 и S_2 при угле наблюдения φ и дальности R .

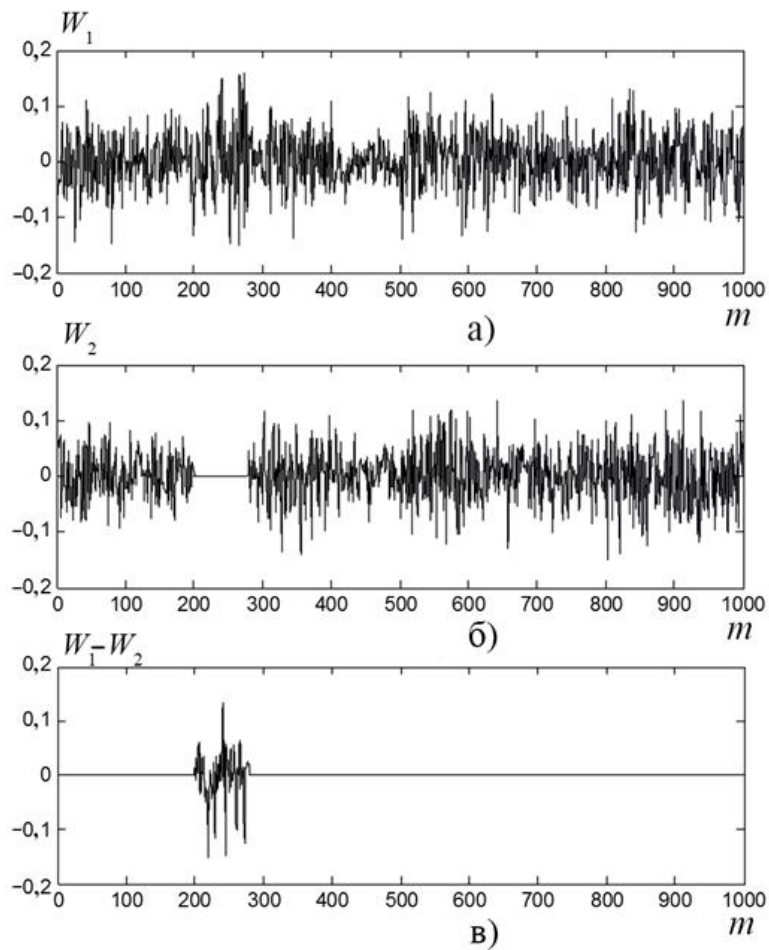


Рис.10. Некоторые результаты моделирования выделения сигнала для общей части
 а) сумма сигналов (W_1) по 160 экспериментам для попарных сумм;
 б) сумму сигналов (W_2) по 160 экспериментам для попарных разностей;
 в) сигнал разности $W_1 - W_2$.

Так как средние значения $\overline{U_{i_n}} = \overline{V_{j_n}} = \overline{U_{i_n} + V_{j_k}} = \overline{U_{i_n} - V_{j_n}} = 0$, то из (2,3) можно получить выражение для дисперсии усредненных сигналов:

$$D = \overline{(U_{i_n} + V_{j_n})^2} = \overline{(\sum_i a_{i_n})^2} + 4 \overline{(\sum_k A_{k_n})^2} + \overline{(\sum_j b_{j_n})^2} + 4 \overline{\sum_i a_{i_n} \sum_k A_{k_n}} +$$

$$+ 2 \overline{\sum_i a_{i_n} \sum_j b_{j_n}} + 4 \overline{\sum_i b_{i_n} \sum_k A_{k_n}} = \overline{(\sum_i a_{i_n})^2} + 4 \overline{(\sum_k A_{k_n})^2} + \overline{(\sum_j b_{j_n})^2} =$$

$$\overline{(\sum_i a_{i_n})^2} + 4 \overline{(\sum_k A_{k_n})^2} + \overline{(\sum_i b_{j_n})^2},$$

$$\text{так как } 4 \overline{\sum_i a_{i_n} \sum_k A_{k_n}} = 0, \quad 2 \overline{\sum_i a_{i_n} \sum_j b_{j_n}} = 0, \quad 4 \overline{\sum_i b_{i_n} \sum_k A_{k_n}} = 0.$$

Аналогично имеем:

$$F = \overline{(U_{i_n} - V_{j_n})^2} = \overline{(\sum_i a_{i_n})^2} + \overline{(\sum_j a_{j_n})^2}. \quad (4)$$

Выражение для усредненной дисперсии имеет вид:

$$D - F = \sigma = 4 \overline{(\sum_k A_{k_n})^2}. \quad (5)$$

Анализ результатов моделирования, представленные в [2], показали, что такой подход позволяет определить дисперсию сигналов выделенного участка поверхности. Кроме того, имеется возможность менять форму элемента разрешения и точность измерения σ .

Выводы

Моделирование процесса выделения сигнала, соответствующего общей площади двух перекрывающихся колец для земной поверхности с двух спутников на геостационарной орбите дало обнадеживающиеся результаты. На данный момент основная проблема заключается в создании более адекватной модели отражения от разнородных площадей S_1 и S_2 , и более детального рассмотрения алгоритма выделения сигнала, соответствующего элементу разрешения.

Заключение

Результаты моделирования показали, что размеры элемента разрешения \mathbf{a} и \mathbf{b} сильно сказываются на угол когерентности $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. Для случая радиолокационных станций на двух геостационарных спутниках на расстоянии 6000км, и использования полосы сигналов 100-200 МГц., когерентность сигналов сохраняется для того чтобы охватить большую часть зоны АЗРФ. В результате возможен мониторинг в непрерывном режиме АЗРФ с разрешением несколько десятков метров

Литература

1. Калинкевич А. А., Масюк В. М., Короткий О. А. О возможности бистатической радиолокации земной поверхности // Вопросы радиоэлектроники.–2017.–№6.–С.6–10.
2. Калинкевич А. А., Масюк В. М., Короткий О. А. Подход к моделированию и анализу результатов бистатической радиолокации земной поверхности // Вопросы радиоэлектроники.– 2017.– №6.–С.11–15.
3. Frey 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
4. Турук В.Э., Верба В.С., Голованова М.В., Голубцов П.Е., Евсиков М.В., Неронский Л.Б, Зайцев С.Э., Толстов Е.Ф. РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2017.– Т.14.– №5.– С.69–83.