# Аномальные характеристики отражения в L и УКВ диапазонах, обусловленные влиянием периодических структур

## М.Ю. Достовалов, С.Л. Внотченко, Р.В. Ермаков, Е.П. Жаровская, Т.Г. Мусинянц, А.В. Теличев

НИИ Точных приборов 127490, Москва, ул. Декабристов, вл.51 E-mail: <u>kotik\_55@mail.ru</u>

Представлено несколько примеров аномальных уровней отражения от бетона и водной поверхности, полученные в результате проведения экспериментальных РЛ съемок PCA «Компакт» в L и УКВ диапазонах. Приведены результаты амплитудных измерений, предложены возможные варианты объяснения их причин отмеченных эффектов. Показано, что одной из причин может оказываться влияние периодических структур, в частности, швов между бетонными плитами, или ветровых волн на водной поверхности. Выдвинуто предположение, что в УКВ диапазоне возможно возникновении резонансных явлений в широкой полосе пространственных гармоник, определяемых шириной полосы зондирующего ЛЧМ сигнала. Сделан вывод о необходимости учета возможности возникновения аналогичных эффектов в других условиях.

Ключевые слова: аномальные характеристики, отражение, L и УКВ диапазон, резонансные явления.

#### Введение

В настоящее время в технологии обработки радиолокационной (РЛ) информации назрела необходимость создания систем автоматизированного (автоматического) дешифрирования. Назначением подобных систем является обнаружение объектов интереса на РЛ изображениях на базе выделения характерных для данных объектов свойств (признаков, или сигнатур) [1-3].

Объекты на РЛ изображениях наблюдаются в окружении различных типов фонов, существенно влияющих на эффективность процесса дешифрирования – обуславливая уровень контрастов, параметры распределений статистических характеристик, наличие текстурных особенностей и т.д. В этой связи, задача исследования характеристик отражения фоновых поверхностей в различных состояниях, определяемых условиями съемки, влиянием сезонной, погодной изменчивости также является весьма актуальной. Анализ отражения РЛ сигналов от земной и водной поверхности в различных условиях проводился многими исследователями. Систематизированные типовые характеристики отражения объектов и фоновых поверхностей приведены, в частности, в [4, 5].

В НИИТП на протяжении ряда лет проводятся разработки и исследования в области авиационных РЛС с синтезированной апертурой (РСА). В рамках разработки семейства мобильных РСА «Компакт» были созданы РЛС и получены представительные наборы экспериментальных данных в Х [6], L [7], а также, совместно в L и УКВ диапазонах [8]. При этом в ряде случаев в L и УКВ диапазонах для некоторых типов фоновых поверхностей (бетон, водная поверхность) были отмечены аномальные характеристики отражения, вызванные воздействием различных факторов. Понятие «аномалии» в данном случае используется как указание на существенные отличия экспериментально зарегистрированных уровней отражений фоновых поверхностей от соответствующих теоретических значений.

В работе представлены примеры подобных аномалий, предложены возможные варианты объяснения их причин. Одной из подобных причин может оказываться влияние периодических

структур. Общим выводом по результатам анализа является необходимость более детального учета внешних условий при проведении РЛ съемки в длинноволновых диапазонах, что позволит, в перспективе, повысить устойчивость (надежность) функционирования систем автоматизированного (автоматического) дешифрирования.

### Отражения от бетона в L диапазоне

В процессе отработки РЛС L диапазона была проведена съемка фрагмента аэродрома, включающего бетонированную стоянку авиатехники. РЛ изображение стоянки и опорное оптическое изображение представлены на рисунке 1. В области стоянки четко различаются 3 типа поверхности – бетон, асфальт и участки травы. РЛ кадр демонстрирует существенное превышение отраженного сигнала от бетона по сравнению с отражением от асфальта.

При РЛ съемке использовалась антенна с азимутальным раскрывом 0,35 м,, что позволило одновременно получить серию из 7 независимых РЛ изображений, с разрешением по азимуту порядка 1,5 метра, из соседних частотных полос доплеровского спектра (в зарубежной терминологии «looks»).

При сравнении сформированных РЛИ было отмечено, что уровень отраженного сигнала от бетонной поверхности существенно повышается (по сравнению с другими направлениями зондирования) при визировании строго «поперек» направления укладки отдельных плит. При этом ракурсе визирования (представленном на рисунке 1), сигнал от бетона возрастает на 7...8 дБ и существенно превосходит уровень отражения от расположенного рядом участка асфальта. При смещении же направления визирования всего на несколько градусов уровень отражения от бетона падает и практически сравнивается с отражением от асфальта.



Рис. 1. РЛ изображение аэродромной стоянки (слева) и опорное оптическое изображение (справа). На кадрах четко различаются 3 типа поверхности – бетон, асфальт и участки травы. РЛ кадр демонстрирует существенное превышение отраженного сигнала от бетона по сравнению с отражением от асфальта. Направление визирования на РЛ кадре – сверху вниз

Рисунок 2 демонстрирует два фрагмента РЛ изображений, полученных из разных частотных полос доплеровского спектра, т.е. под различными углами в азимуте. Угловое рассогласование между изображениями составляет 5 градусов (задание поднесущих частот для обрабатываемых фрагментов доплеровского спектра соответствовало визированию под углами -1,41° и +3,57°). На изображениях выделено по 3 измерительные площадки в областях асфальта, бетона и травы, для которых были проведены измерения УЭПР (с использованием внешней калибровки по уголковым отражателям). Величины УЭПР в децибелах отображены для каждой площадки. Рисунок 2 показывает, что смещение ракурса визирования на 5° приводит к незначительным изменениям уровней отражений от асфальта и травы (-0,7... -1,6 дБ), в то время, как отражение от бетона меняется почти на 8 дБ.

Величины УЭПР площадок асфальта, бетона и травы в зависимости от изменения ракурса визирования в азимутальной плоскости (в пределах ширины реальной диаграммы направленности антенны) были проанализированы в диапазоне +/- 11 градусов. Результаты анализа представлены на рисунке 3.



Рис. 2. Фрагменты РЛИ, полученных из разных частотных полос доплеровского спектра. Угловое рассогласование между кадрами - 5°. На кадрах выделены измерительные площадки в областях асфальта, бетона и травы. Для каждой площадки отображены величины УЭПР в децибелах. Смещение ракурса визирования на 5° в азимуте приводит к незначительным изменениям уровней отражений от асфальта и травы (-0,7... -1,6 дБ), тогда, как отражение от бетона меняется почти на 8дБ. Направление визирования – сверху вниз

Отсчет угла наблюдения на рисунке 3 (ось абсцисс, обозначенная «Азим. угол») велся от нулевого положения доплеровского спектра, которое совпадало с перпендикуляром к траектории носителя. Поскольку направление линии траектории несколько отличалось от направления оси стоянки (направления укладки плит), максимальное значение оказалось сдвинуто на угол порядка 1,5°



Рис. 3. Изменение УЭПР площадок асфальта, бетона и травы при изменения ракурса визирования в азимутальной плоскости (Азим. угол [град]). Явно выраженное возрастание уровня отраженного сигнала характерно только для участков бетона, при этом, погрешность калибровки не превосходит 1 дБ

Рисунок демонстрирует, что явно выраженное возрастание уровня отраженного сигнала характерно только для участков бетона. Уровни отражения остальных типов поверхностей (УЭПР) хорошо согласуются с данными, приводимыми в литературе [5] и меняются весьма плавно, при этом, погрешность калибровки РЛ изображений не превосходила 1 дБ.

Наиболее вероятной причиной отмеченного эффекта является отражение от кромок бетонных плит, уложенных на стоянке. В случае, когда плиты расположены параллельно линии полета носителя, зондирующий сигнал отражается от кромок и боковых вертикальных стенок плит, работающих по принципу двугранного уголкового отражателя. Подобный механизм объясняет быстрое снижение уровня отраженного сигнала при небольшом изменении ракурса визирования в азимуте.

В результате последующего анализа было установлено, что размеры плит составляли 5 м вдоль направления полета и 2 м в направлении дальности, в то время как фактическое разрешение РСА по дальности (измеренное по отражателям) составило порядка 2,25 м. Этим объясняется то, что отражения от кромок соседних плит по дальности не различаются. Дополнительной особенностью данного сюжета явилось то, что на РЛ кадре на рисунке 1 хорошо заметны темные полосы в вертикальном направлении, соответствующие «поперечным» швам между плитами, имеющим ширину всего несколько сантиметров.

Подобные эффекты необходимо учитывать, в частности, в случаях, когда осуществляется автоматизированное обнаружение объектов, расположенных на бетоне, или, когда возникает задача сравнения характеристик объектов на различных РЛ изображениях – т.е. взаимной калибровки изображений. Часто взаимная калибровка осуществляется сопоставлением уровней отражения типовых фоновых поверхностей – бетон, трава, водная поверхность, - наблюдаемых на обоих кадрах. Существенные неучтенные изменения уровня отраженного сигнала в подобных случаях могут внести значительные погрешности при определении амплитудных характеристик объектов.

#### Отражения от бетона в УКВ диапазоне

При отработке аппаратуры УКВ диапазона были проведены съемка вертолетного аэродрома с бетонной рулежной дорожкой и площадками для взлета и стоянки вертолетов, окруженными поверхностью с травяным покровом. Съемка проводилась с разных ракурсов. При этом была обнаружена существенная разница в уровнях отражения от бетонного покрытия при визировании вдоль и поперек оси рулежной дорожки. При визировании поперек оси рулежки в УКВ диапазоне от участков бетона наблюдался мощный отраженный сигнал, сравнимый по мощности с отражениями от искусственных объектов.

Рисунок 4 демонстрирует опорное оптическое изображение, включающее рулежную дорожку (слева), а также, два кадра РЛ изображений УКВ диапазона, Центральный РЛ кадр рисунка 4 был получен при визировании сверху вниз (вдоль оси рулежной дорожки), в то время, как визирование правого кадра осуществлялось справа налево (поперек оси рулежки).

Углы наблюдения рулежки в вертикальной плоскости составляли 76° (от надира) при визировании вдоль оси и 62° при визировании поперек оси. Направления визирования дополнительно указаны стрелками в верхней части РЛ кадров.

Для двух измерительных площадок бетона (метки 1 и 2, соответственно) и одной площадки травы, выделенных рамками на РЛ кадрах, на рисунке 4 представлены значения УЭПР в децибелах. Выделение требуемых зон бетона в пределах измерительных площадок осуществлялось специальными графическими масками. Уровни контрастов между областями бетонного покрытия и окружающей травой составили 6,6 и 1,4 дБ (+4 дБ в среднем) при визировании вдоль оси, и 15,7 дБ и 16,1 дБ (+15,9 дБ в среднем) при визировании перпендикулярно оси рулежной дорожки.

Для анализируемых участков бетонной поверхности (участок 1 слева, участок 2 справа) на рисунке 5 представлены фрагменты детального оптического изображения. Отчетливо просматриваются швы между отдельными плитами, в ряде случаев (участок 2), швы заросли травой. Прямые линии на окружающей траве – следы движения техники, производившей покос.

Погодные условия во время проведения РЛ съемки включали частые кратковременные дожди, что позволяет предположить, что швы между плитами были пропитаны влагой.

В результате, при направлении визирования справа налево длинная боковая стенка плиты оказывается как раз перпендикулярна направлению распространения волны что создает условия для появления сильного отраженного сигнала, наблюдаемого на правом РЛ кадре рисунка 4.

Подобное сочетание факторов является в значительной степени повторением ситуации, рассмотренной в предыдущем разделе, и позволяет предположить существенное влияние эффекта отражения от боковых вертикальных стенок отдельных плит.

В этой связи был проведен анализ наличия аналогичного эффекта на РЛ изображениях, полученных синхронно в L диапазоне. Изображения с тех же самых ракурсов были проанализированы по всему диапазону доплеровских частот (от -11° до +11°). Пример совмещенных изображений L и УКВ диапазона, для ракурсов, аналогичных представленным на рисунке 4, приведен на рисунке 6.

Отсутствие похожих эффектов в L диапазоне приводит к заключению, что при зондировании в УКВ диапазоне существует дополнительная возможность возникновения аномальных уровней отражения, обусловленная наличием периодических структур.

При анализе геометрических размеров оказалось, что поперечный размер бетонной плиты достаточно близок к половине длины волны центральной рабочей частоты PCA УКВ диапазона. В результате, с учетом угла наблюдения в вертикальной плоскости, для определенных длин волн в пределах полосы частот используемого ЛЧМ сигнала, на параллельных кромках соседних рядов плит возникает кратность интервалов распространения, что создает условия для дополнительного взаимного усиления отраженных сигналов.



Рис. 4. Опорное оптическое изображение, включающее рулежную дорожку (слева), а также, два кадра РЛ изображений УКВ диапазона, Центральный кадр получен при визировании вдоль оси рулежной дорожки. Визирование правого кадра - справа-налево (поперек оси рулежки). Направления визирования указаны стрелками в верхней части РЛ кадров. Для двух измерительных площадок бетона и одной площадки травы, выделенных рамками на РЛ кадрах, представлены значения УЭПР в децибелах. Уровни контрастов между областямими бетона и окружающей травой составили +4 дБ в среднем, при визировании вдоль, и около +16 дБ при визировании поперек оси бетонной рулежной дорожки



Рис. 5. Фрагменты детального оптического изображения для анализируемых участков бетонной поверхности. Участок 1 слева, участок 2 справа. Отчетливо просматриваются швы между отдельными плитами. Ориентация фрагментов соответствует рисунку 4



Рис. 6. Слева: РЛ изображение УКВ диапазона с мощным отраженным сигналом от бетонной рулежной дорожки. Справа: РЛ изображение L диапазона, синхронно полученное с УКВ изображением. В центре: Изображение L диапазона, полученное с другого ракурса. Вывод: в L диапазоне мощных отражений от рулежной дорожки не зафиксировано

Наблюдаемый эффект значительного повышения уровня отраженного сигнала от участков бетонного покрытия требует проведения более детальных исследований по анализу механизмов его возникновения, и, в частности, по оценке степени влияния периодических структур. Также, следует учитывать возможность возникновения аналогичных эффектов и в других условиях, что требует проведения тщательного анализа характеристик отражения объектов и фоновых поверхностей при РЛ зондировании в длинноволновом диапазоне.

#### Отражения от водной поверхности в L и УКВ диапазонах

С использованием РСА «Компакт» были проведены серии синхронных РЛ съемок различных участков местности в L и УКВ диапазонах. В процессе проведения работ были зафиксированы существенные отличия в РЛ изображениях взволнованной водной поверхности в дециметровом и метровом диапазонах длин волн.

На рисунке 7 представлены РЛ изображения озера размером порядка 1,5 километров, одновременно полученные в L и УКВ диапазонах. Направление визирования – сверху – вниз. Вертикальная полоса на кадре УКВ диапазона вызвана воздействием сигнала внешней помехи.

Съемка проводилась в ветреную погоду, скорость ветра превышала 10 м/с, что привело к некоторому ухудшению качества изображений и повышению уровня геометрических искажений. В то же время, ветер привел к возникновению волнения на озере, проявляющемуся на РЛ изображении.



Рис. 7. РЛ изображения озера среднего размера, одновременно полученные в L и VKB диапазонах. Направление визирования – сверху – вниз. Справа: изображение VKB диапазона. Взволнованная вода формирует отраженный сигнал близкий по уровню к отражению травяного покрова земной поверхности (VЭПР -25...-26 дБ). На водной поверхности четко выделяется область ветровой тени, отражения от которой на 10 дБ ниже. Слева: изображение L диапазона. Контраст между водой и земной поверхностью составляет около 16 дБ. Область ветровой тени не наблюдается

На РЛИ УКВ диапазона отчетливо видна область ветровой тени, расположенная у дальнего (относительно носителя PCA) берега озера. Область «спокойной» воды характеризуется отрицательным контрастом порядка - 10дБ по сравнению с остальной водной поверхностью. Предполагаемое (по форме ветровой тени) направление ветра, и, соответственно, распространения волн, – по диагонали из левого нижнего угла изображения.

В представленном сюжете зондирование производилось сверху, со стороны открытой воды, поэтому, известный эффект радиолокационного затенения полностью отсутствовал. Таким образом, можно считать, что отмеченный уровень контраста обусловлен отличием параметров волнения, характерных для данной области.

Примечательной особенностью данного сюжета является то обстоятельство, что область ветровой тени никак не просматривается на РЛ изображении L диапазона даже при значительном увеличении его яркости. Это может указывать на следующие обстоятельства:

• Параметры волнения в данном конкретном водоеме таковы, что, в частотной области, на которую «реагирует» PCA L диапазона не формируется отраженный сигнал достаточного уровня (хотя на других водоемах, при съемке в L диапазоне в аналогичных условиях, отражения от водной поверхности наблюдались устойчиво).

• Структура волнения с параметрами, существенными для PCA L диапазона одинакова по всей водной поверхности, включая область ветровой тени.

Необходимо отметить, что в соответствии с известными моделями отражения от водной поверхности [4, 5, 9], считается, что наблюдаемый уровень отраженного сигнала в метровом

диапазоне должен быть существенно ниже, чем в дециметровом. Поэтому, наблюдаемые на РЛИ УКВ диапазона изменения контраста в области ветровой тени свидетельствуют о наличии специфических (и недостаточно исследованных) особенностей рассеивания длинноволнового РЛ сигнала на периодической структуре ветрового волнения.

В качестве первого приближения можно предложить следующие положения, качественно объясняющие полученные экспериментальные результаты:

A) Отраженный РЛ сигнал от взволнованной водной поверхности формируется, как в L, так и
в УКВ диапазоне, на волнах с пространственной гармоникой, определяемой соотношением:
λ

 $\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$ , где  $\lambda$  – длина волны РЛ сигнала,  $\theta$  – вертикальный угол наблюдения элемента

поверхности. В РСА УКВ диапазона наблюдаются крупные гравитационные волны.

Б) Механизмы рассеяния РЛ сигнала водной поверхности [10] на данном этапе не затрагиваются. Тем не менее, вероятно, допустимо рассматривать представленный в предыдущем разделе пример отражения от стыков бетонных плит как результат рассеяния РЛ сигнала на волне с фиксированной пространственной частотой.

В) Особенностью РСА УКВ диапазона является ее относительная широкополосность – большое значение отношения ширины полосы РЛ сигнала к средней несущей частоте. В результате, для отраженных сигналов условие резонанса возникает не на единственной волне, а в пределах целого диапазона пространственных гармоник, определяемых диапазоном ( $\lambda$ \_min ...  $\lambda$ \_max) – шириной полосы зондирующего ЛЧМ сигнала. Возможно, относительное «повышение» чувствительности в передаче состояния водной поверхности в РСА УКВ диапазона определяется расширением используемой полосы пространственного спектра неровностей поверхности.

Исходя из представленных соотношений можно предположить, что ветровая тень на РЛ изображении УКВ диапазона наблюдается вследствие того, что на небольшом расстоянии от берега не успевают сформироваться волны с соответствующим пространственным периодом. При этом, более короткие волны, соответствующие L диапазону, формируются существенно быстрее, что объясняет равномерность изображения водной поверхности на РЛИ L диапазона.

Тем не менее, необходимо отметить, что обоснованная интерпретация РЛ изображений водной поверхности в УКВ диапазоне требует дальнейших значительных исследований.

#### Заключение

В работе представлены несколько примеров аномальных уровней отражения от бетона и водной поверхности, полученные в результате проведения экспериментальных РЛ съемок РСА «Компакт» в L и УКВ диапазонах. Приведены результаты амплитудных измерений, предложены возможные варианты объяснения их причин отмеченных эффектов.

Показано, что одной из причин может оказываться влияние периодических структур, в частности, швов между бетонными плитами создающих контрасты до 8 дБ в L диапазоне и до 16дБ в УКВ диапазоне. К аналогичным результатам может приводить в УКВ диапазоне наличие ветровых волн на водной поверхности (с уровнем контраста до 10дБ).

Выдвинуто предположение, что в УКВ диапазоне возможно возникновении резонансных явлений в широкой полосе пространственных гармоник, определяемых диапазоном ( $\lambda$ \_min ...  $\lambda$ \_max) – шириной полосы зондирующего ЛЧМ сигнала.

Сделан вывод о необходимости учета возможности возникновения аналогичных эффектов в других условиях. Это требует проведения тщательного анализа характеристик отражения объектов и фоновых поверхностей при РЛ зондировании в длинноволновом диапазоне.

#### Литература

1. Novak L.M. State of Art of SAR Automatic Target Detection/Recognition // Proc. EUSAR 2000, pp. 683-686.

2. Suchandt S., Runge H., Breit H., et al. Traffic Measurement with TerraSAR-X: Processing System OverView & First Results // Proc. EUSAR 2008, Vol.4, pp. 55-58.

3. Brekke C., Helleren O., Olsen R. Ship Traffic monitoring using multi-polarisation satellite SAR images combined with AIS reports // Proc. EUSAR 2008, Vol.1, pp. 81-85.

4. Сколник М. Справочник по радиолокации. Т.1. М.: Советское Радио, 1976.

5. Long M.W. Radar Reflectivity of Land and Sea. Artech House, Boston, 2001.

6. Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Зайцев А.Б., Мусинянц Т.Г. Результаты измерений ЭПР искусственных и естественных объектов по радиолокационным изображениям РСА КОМПАКТ-100 // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С. 1-9.

7. Dostovalov M., Lifanov A., Moussiniants T. Comparative Analysis of Images Obtained by Twofrequency (X, L band) Airborne SAR // EUSAR-2006 Proceedings, № P15.1.

8. Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Ермаков Р.В., Жаровская Е.П., Мусинянц Т.Г. Сравнительный анализ радиолокационных характеристик отражения объектов и фоновых поверхностей в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах // Исследования Земли из космоса, 2009. №3. С.1-10.

9. *Каневский М.Б.* Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004.

10. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН, 2003. Т.173. №1. С. 69-87.

## Anomaly High Backscattering levels at L and VHF band SAR Images Caused by Influence of Periodical Structures

### M.Y. Dostovalov, S.L. Vnotchenko, R.V. Ermakov, E.P. Zharovskaya, T.G. Moussiniants, A.V. Telichev

FSUE Research Institute of Precision Instruments 51, Dekabristov St., Moscow, Russia, 127490 E-mail: <u>kotik\_55@mail.ru</u>

Some examples of anomaly high backscattering levels from concrete and water surfaces at L and VHF bands are demonstrated. The results of amplitude level measurements are presented, possible causes of observed effects are discussed. One of that possible causes can be the influence of periodical structures such as seams between concrete plates or wind waves at the water surface. It was suggested that at VHF band resonance occurrences can have place for wide band of spatial frequencies due to wide frequency band the radar signal. The conclusion of the need to take into account the possibility of appearance of the same type effects is made.

Keywords: backscattering, L and VHF bands, resonance, periodical structures.