

УДК 551.463

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ АНОМАЛИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПАНОРАМНОЙ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ СОВМЕЩЁННОЙ СИСТЕМЫ

К.С. МОСОЯН, Г.И. МАРИНОСЯН

Научно-производственный институт "Комета"

(Поступила в редакцию 5 июля 2003 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования фоновых слабоконтрастных аномалий морской поверхности с помощью восьмилучевой-восьмиканальной совмещенной активно-пассивной панорамной системы. Система обеспечивала контрастную чувствительность 0,1-0,2 дБ и флуктуационную чувствительность 0,1К на элементе разрешения 100×130 м. Построено и проанализировано большое количество гистограмм распределений размеров и контрастов аномальных образований, наблюдаемых в радиолокационном и радиометрическом каналах. Определены условия сходимости распределений размеров аномальных образований к генеральному распределению, показаны возможные границы изменения частных распределений. Показано, что активный и пассивный сигналы частично коррелированы.

Дистанционные радиофизические исследования морской поверхности с помощью радиолокационных и радиометрических устройств в последние десятилетия проводятся весьма активно. Исследование закономерностей рассеянного и собственного излучения морской поверхности в зависимости от гидрофизических параметров, силы и направления ветра, температуры, внутренних волн, степени загрязнения и т.п. при решении ряда народнохозяйственных задач обещает несомненный экономический эффект.

Обычно исследования проводятся и полученные данные обрабатываются отдельно по локационным [1] и теплолокационным [2] наблюдениям. В последние годы возрос интерес к комплексированным, не совмещенным активно-пассивным системам и рассматриваются вопросы оптимальной обработки рассеянных полей и полей собственного радиотеплового излучения [3]. Эффективность решения вышеуказанных задач несомненно повысится при проведении исследований с помощью совмещенных активно-пассивных панорамных систем с высокой фоно-контрастной чувствительностью в активном и флуктуационной чувствительностью в пассивном каналах [4].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования фоновых слабоконтрастных аномалий морской поверхности с помощью 8-лучевой, 8-миканальной совмещенной активно-пассивной пано-

рамной системы 4-х см диапазона волн, разработанной в научно-производственном институте "Комета".

Аппаратура обеспечивает излучение высокочастотной энергии, прием, регистрацию рассеянного и собственного излучения подстилающей поверхности параллельно по 8-ми каналам. Каналы организованы так, что каждый является общим для активного и пассивного сигналов, т.е. активный (рассеянный) и пассивный (собственное излучение) сигналы принимаются одновременно из одной и той же области подстилающей поверхности на одной и той же частоте, проходят через антенно-фидерный тракт, СВЧ приёмное устройство и разделяются только после предварительного усиления на сверхвысоких частотах. В СВЧ и низкочастотном блоках предприняты специальные меры для разделения активного и пассивного сигналов.

Приёмно-передающие устройства каждого канала выполнены в гибридно-интегральном исполнении и имеют очень малые размеры. Все восемь каналов размещаются под рефлектором антенны. Рефлектор 8-лучевой антенны представляет собой усечённое сферо-параболическое зеркало (прямоугольная вырезка из параболического тороида). Такой профиль позволяет получить фокальную линию, вдоль которой расположена система рупорных облучателей, формирующих в одной плоскости 8 независимых лучей. Рупоры запитываются через устройство разводки, собранное на квадратных волноводах. В антенно-фидерный тракт встроены также ферритовые вращатели плоскости поляризации.

При решении многих из вышеперечисленных задач особенно важное место занимают исследования статистических характеристик естественных фоновых образований. С помощью активно-пассивной панорамной системы были проведены многочисленные радиолокационные и радиотепловые измерения естественного морского фона. Самолёт летал на высотах от 200 м до 1 км. Обработке подвергались записи, полученные на участках полёта без крена и тангажа. Поскольку точность измерения контрастов в радиолокационном канале аппаратуры составляла 0,1...0,2 дБ (при постоянной времени накопления $\tau = 1$ с и разрешении на поверхности $r = 100...130$ м) при построении гистограмм учитывались только неоднородности фона с контрастом больше 0,5 дБ и протяженностью свыше 500 м. В радиотепловом канале учитывались контрасты, превышающие по абсолютной величине порог 0,5 К.

Фоновые исследования проводились на Черном море при температуре $\sim 22^\circ\text{C}$ и солёности $S \sim 18\%$, на Тихом океане при температуре $\sim 18^\circ\text{C}$, $S \sim 35\%$. Общая статистика составляла 24 галса с общей протяженностью 1150 км для Черного моря и 46 галсов протяженностью 2800 км на Тихом океане.

Все регистрограммы фоновых галсов, полученные на Черном море, были разделены на две группы, в зависимости от степени взволнованности моря, и по ним определялись средние значения контрастов неоднородностей и их протяженность.

В качестве аномальных образований рассматривались участки регис-

программ радиолокационных (РЛ) и радиометрических (РМ) сигналов, в которых уровень сигналов превышал (положительный контраст) или не достигал (отрицательный контраст) среднефоновому уровню. Значения радиолокационных ($\Delta\sigma$) и радиотепловых (ΔT_b) контрастов определялись по формулам

$$\Delta\sigma = 10 \lg \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_\phi} \right), \quad \Delta T_b = (\bar{y} - \bar{y}_\phi) \frac{\beta_k}{\gamma_k}$$

где \bar{x} и \bar{y} – средние значения амплитуд РЛ и РМ сигналов в аномальном образовании, а \bar{x}_ϕ и \bar{y}_ϕ – среднефоновые уровни РЛ и РМ сигналов для галса, β_k и γ_k – параметры калибровочного сигнала на регистрограмме.

Были построены гистограммы распределений размеров L и контрастов k_σ ($k_\sigma = \Delta\sigma$) аномальных образований, наблюдаемых в радиолокационном канале, при скорости ветра $2 \div 5$ м/с и $8 \div 14$ м/с, для Черного моря. Анализ гистограмм (рис.1 и 2) показывает, что при слабом волнении, при скорости ветра от 2 до 5 м/с, наиболее вероятные размеры неоднородностей морского фона сосредоточены в интервале $0,5 \div 2,5$ км, при средних контрастах 1,5 дБ. С увеличением волнения, при скоростях ветра $U = 8 \div 14$ м/с, протяженность их несколько уменьшается (до 2 км), а контрастность растет ($k_\sigma = -2,0 \div +1,7$).

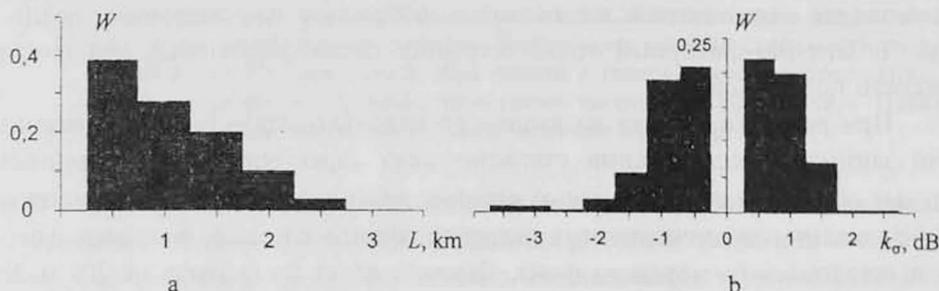


Рис.1. Гистограммы распределений размеров (а) и контрастов (б) аномальных образований фона при слабом волнении ($U=2 \div 5$ м/с). W – число аномальных образований в интервале ΔL или Δk_σ , отнесенное к общему числу аномалий.

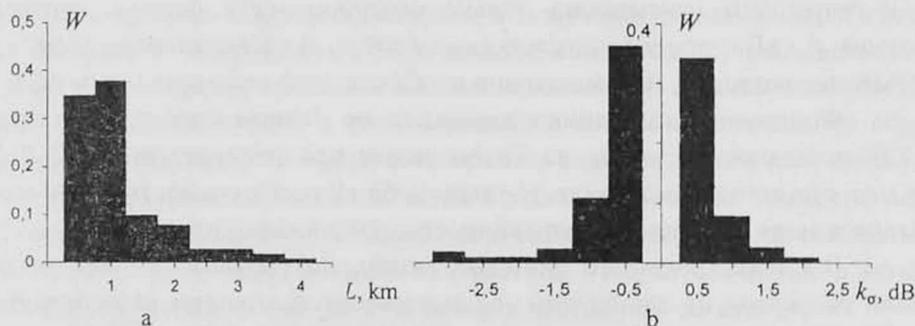


Рис.2. Гистограммы распределений размеров (а) и контрастов (б) аномальных образований фона при среднем волнении ($U=8 \div 14$ м/с).

При этом средняя протяженность неоднородностей для слабого волнения составляет $M/L = 1,2$ км, а среднеквадратичное значение $\sigma/L = 0,63$ км. При среднем волнении соответственно имеем $M/L = 1,0$ км, $\sigma/L = 0,5$ км. Для распределений контрастов следует: $M(k_\sigma) = 0$, $\sigma(k_\sigma) = 0,6$ дБ для слабого волнения, $M(k_\sigma) = 0$, $\sigma(k_\sigma) = 1,1$ дБ для среднего волнения.

Из рассмотрения гистограмм видно, что при увеличении абсолютных значений контрастов и пространственных размеров неоднородностей наблюдается резкое уменьшение вероятности их появления.

Сопоставительный анализ распределений размеров и контрастов аномальных образований показал, что для акватория Тихого океана наблюдается заметное различие, заключающееся в большей протяженности (до 15... 20 км) и контрастности. Анализ условных распределений контрастов неоднородностей при фиксированных размерах и различных скоростях ветра показал, что условные распределения приблизительно описываются гауссовским законом.

При штилевой погоде неоднородности морского фона, наблюдаемые в радиолокационном канале под углами 40...60°, обусловлены, в основном, нестационарностью ветрового поля. Возникающая при этом рябь приводит к резкому увеличению отраженного сигнала, которая регистрируется в виде сильноконтрастных образований со значением контрастов до 10 дБ и более. Пространственные размеры этих неоднородностей могут составлять от нескольких сотен метров до нескольких километров.

Оценка «поперечных» (поперек трассы полета) размеров неоднородностей фона производилась по наблюдаемости в соседних лучах, каждая из которых представляла собой одномерную реализацию поля распределений. Почти всегда неоднородности фона наблюдались во всех 8-ми лучах аппаратуры, пространственная разнесенность (зона обзора) которых равнялась высоте полета и составляла порядка 1 км. Вследствие этого можно заключить, что подавляющее большинство неоднородностей естественного морского фона представляют собой крупномасштабные образования с характерными размерами, большими (0,7...1) км.

В ходе специальных экспериментов на Чёрном море оценивалась сходимость частных распределений к генеральному, соответствующему конкретным условиям волнения, и определялись границы возможных изменений этих распределений. С целью определения минимального количества галсов или эквивалентной площадки морской поверхности, на которой частные, одномерные распределения размеров сходятся к генеральному, отдельно для положительных и отрицательных контрастных образований фона были построены гистограммы, усредненные по 12 реализациям (рис.3).

Там же приведены границы возможных отклонений частных распределений. Их сравнение показывает, что имеется некоторое различие по размерам для отрицательных и положительных контрастов. Неоднородности фона с отрицательной контрастностью несколько более протяженные. Анализ

подобных распределений, полученных для различных условий волнения при скоростях ветра от 3 до 12 м/с, показал, что для сходимости частных распределений к генеральному с ошибкой, не превышающей 10%, необходимо, по крайней мере, усреднение по 12...15 галсам.

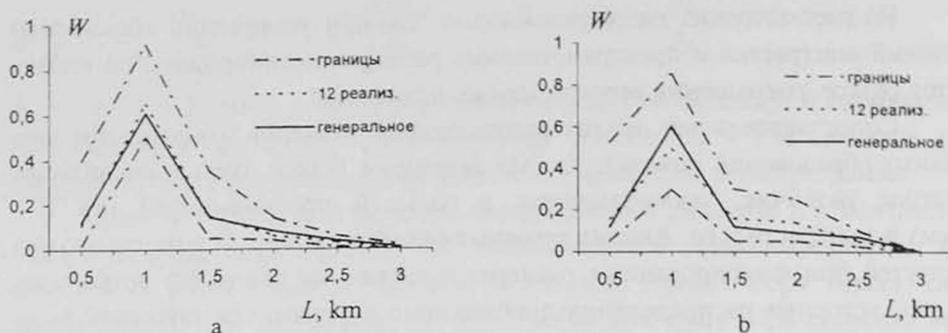


Рис.3. Возможные границы изменений частных распределений, сравнительные характеристики распределений, усреднённых по 12 реализациям, генеральные распределения для положительных (а) и отрицательных (б) контрастных образований фона.

В радиотепловом канале на средних углах также наблюдается значительная неоднородность морского фона. Пространственная и временная неоднородность ветрового поля, температуры воды, степени загрязнения, наличия slickов (визуально наблюдаемых «выглаженных» участков поверхности), пены и т.д. приводят к изменению радиоизлучения и образованию на морском фоне большого количества радиотепловых контрастных образований, размеры которых достигают нескольких километров. Контрасты радиояркой температуры на вертикальной поляризации, в основном, сосредоточены в интервале от $-1,5$ К до $+1,5$ К. Максимальные же наблюдаемые контрасты достигают 4 К на вертикальной поляризации и 6 К на горизонтальной. Эти результаты хорошо согласуются с расчетными данными, согласно которым на углах $45...50^\circ$ при изменении ветра от 0 до 8 м/с ветровые приращения составляют 2...4 К на вертикальной поляризации и 5...6 К на горизонтальной [4].

Установлено, что статистика распределений радиотепловых неоднородностей весьма слабо зависит от состояния волнения. На рис.4 приведены гистограммы распределений контрастов $k_T (k_T = \Delta T_b)$ и размеров радиотепловых неоднородностей фона.

Наиболее вероятные размеры и контрасты образований фона при слабом и умеренном волнении составляют 0,6...1,5 км и $\pm(0,5...1,5)$ К. Сходимость частных распределений по размерам и контрастам к генеральным в радиотепловом канале такая же, как и в радиолокационном, т.е. для достижения в пределах 10% генеральной статистики необходимо усреднение примерно 12...15 галсов протяженностью 25±30 км.

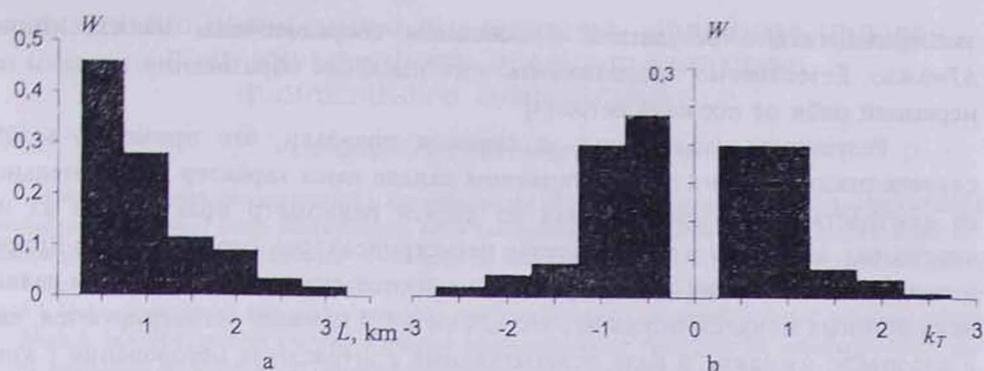


Рис.4. Гистограммы распределений размеров (а) и контрастов (б) радиотепловых аномалий морского фона.

Эксперименты с сопоставлением радиотепловых образований морского фона с визуальными наблюдениями показали, что пенные образования регистрировались в виде положительных приращений радиояркой температуры, величина которых пропорциональна площади, занимаемой пенной областью, а также зависит от толщины и структуры пены. При слабом и умеренном волнении измеренные всплески радиотеплового сигнала не превышают нескольких градусов.

Так как аппаратура позволяла одновременно получать РЛ и РМ изображения морской поверхности, то представляло интерес исследование вопроса о взаимосвязи радиолокационных и радиотепловых контрастных образований.

Совместное рассмотрение результатов РЛ и РМ наблюдений показало, что относительное число аномалий, регистрируемых только в РЛ канале или только в РМ канале, достаточно большое и составляет примерно 80% для Черного моря и 63% для Тихого океана. При сильной нестационарности фона относительное число аномалий, зарегистрированных только в РЛ или РМ каналах составляет примерно 40% от общего числа аномалий. Кроме того, анализ результатов, полученных при скорости ветра 5-7 м/с, показал, что аномальные образования, одновременно регистрируемые в РЛ и РМ каналах на вертикальной поляризации, не всегда подчиняются условию одинаковости знаков радиолокационных и радиотепловых контрастов. Этот результат вполне объясним в рамках двухмасштабной модели и расчетных активно-пассивных корреляционных связей, приведенных в [4], откуда следует, что коэффициент корреляции зависит от скорости ветра и степени взволнованности морской поверхности. Помимо этого аномалии могут быть вызваны не только изменением мелкомасштабной структуры волнения, но также и влиянием крупной структуры, нефтяных пленок, загрязнений и т.д.

Сопоставление значений контрастов всех аномалий, обнаруженных в РЛ и РМ каналах при штилевой погоде, показало, что имеет место достаточно уверенная корреляция между ними. На плоскости $\Delta T \leftrightarrow \Delta \sigma$ полученные

экспериментально результаты в основном сосредоточены вблизи линии $\Delta T \approx 0.4\Delta\sigma$. Естественно предположить, что подобные образования вызваны генерацией ряби от порывов ветра [4].

Результаты наблюдений за сликками показали, что примерно в 50% случаев отклик на них в радиотепловом канале имел характер положительного контраста. В четырех случаях из десяти радиометр практически их не чувствовал, и только в одном случае регистрировалось отрицательное приращение. Сопоставление этих результатов с соответствующими данными радиолокационных каналов показало, что слики в РЛ каналах регистрируются, как и следовало ожидать, в виде отрицательных контрастных образований с контрастом от -2 до -4 дБ. Вероятным объяснением здесь может быть то, что РЛ канал, при данном угле наблюдения, преимущественно реагирует на изменения мелкомасштабной компоненты волнения, в то время как РМ канал реагирует не только на рябь, но и на наличие пленок поверхностно активных веществ, в том числе и нефтяных. Возможно, именно наличие нефтяной пленки привело к тому, что в некоторых экспериментах по наблюдению сликов отрицательному контрасту в РЛ канале соответствовал положительный контраст в РМ канале. Естественно, при таких простейших случаях декорреляции РЛ и РМ сигналов при обучении системы возможно определить характер аномалий.

Анализ полученных нами результатов позволяет сделать следующие выводы. На морской поверхности существует множество аномальных образований естественного происхождения. Значительная часть этих аномалий ($\sim 60\%$) наблюдается только в одном из каналов: либо в РЛ канале, либо в РМ канале. Пространственные размеры фоновых аномалий сосредоточены в интервале $0,5 \div 2,5$ км, а в некоторых случаях могут достигать $35 \dots 40$ км. Величина РЛ контрастов фоновых образований может изменяться в пределах от 6 до $+3,5$ дБ. Величина РМ контрастов фоновых аномалий может составлять от -3 до $+2$ К. Условные распределения контрастов приблизительно описываются гауссовским законом. Использование активно-пассивной одновременной радиолокации даёт возможность определить класс слабоконтрастных аномалий на морской поверхности, а в некоторых простейших случаях при обучении системы можно определить характер аномалий.

Сигналы активного и пассивного каналов нельзя считать независимыми, они до 40% коррелированы.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.И.Митигна, В.Г.Пунгин и др. Известия АН СССР, ФАО, 5, 37 (1991).
2. В.Е.Венславский, Н.М.Масленников и др. Исследование Земли из космоса, 5, 25 (1990).
3. В.К.Волосюк, В.Ф.Кравченко. Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. № 2 (2002).
4. Г.Г.Бахшян, Г.И.Мариносян, К.С.Мосоян. Изв. вузов, Радиофизика, 34, 630 (1991).

ՄԻԱՎՈՐՎԱԾ ԱԿՏԻՎ-ՊԱՍԻՎ ՊԱՆՈՐԱՄԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄԻՋՈՅՈՎ
ԾՈՎԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ԹՈՒՅԼ ԿՈՆՏՐԱՍՏԱՅԻՆ
ԱՆՈՍԱԼԻԱՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Կ.Ս. ՄՈՍՈՅԱՆ, Գ.Ի. ՄԱՐԻՆՈՍՅԱՆ

Բերված են ութնառագայթային և ութկանալային միավորված ակտիվ-պասիվ պանորամային համակարգի միջոցով ծովի մակերևույթի թույլ-կոնտրաստային անոմալիաների փորձնական հետազոտությունների արդյունքները: Համակարգը ապահովում է 0,1 – 0,2 դԲ կոնտրաստային և 0,1K ֆլուկտուացիոն զգայունություններ 100x130մ տարբերակիչ էլեմենտների դեպքում: Կառուցված և հետազոտված են մեծ քանակությամբ ռադիոլոկացիոն և ռադիոմետրային անոմալիաների չափերի և կոնտրաստների բաշխվածության հիստոգրամներ: Որոշված են անոմալիաների չափերի բաշխման զուգամիտման պայմանները: Ցույց են տրված մասնակի բաշխման սահմանների հնարավոր փոփոխությունները: Փորձնականորեն հաստատված է, որ ակտիվ և պասիվ ազդանշանները մասնակի կորելացված են:

INVESTIGATION OF THE MARINE SURFACE WEAK-CONTRASTING
ANOMALIES BY PANORAMIC COMBINED ACTIVE-PASSIVE SYSTEM

K.S. MOSOYAN, G.I. MARINOSYAN

The results of experimental investigation of the sea surface weak-contrasting anomalies by the eight beam-eight channel combined active-passive panoramic system are presented. It provides the contrast sensitivity 0.1-0.2 dB and fluctation sensitivity 0.1K on the element of resolving power 100x130 m. A lot of histograms of distributions of sizes and contrasts of abnormal formations, observed in radio-locating and radiometric channels are constructed and analyzed. The possible boundaries of marginal distribution changes are shown. It is shown that active and passive signals are partly correlated.