

УДК 551.25:629.78

В. В. Малиновский, В. В. Пустовойтенко

Товариство з обмеженою відповідальністю ДВС ЛТД, Севастополь
Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь

Шумовые характеристики канала радиолокатора бокового обзора ИСЗ «Січ-1»

Надійшла до редакції 29.12.00

Приводяться результати досліджень параметрів шумів у інформації радіолокатора бокового огляду ІСЗ «Січ-1». Показано, що шуми каналу призводять до похибки визначення швидкості привідного вітру 10—20 %. В радіолокаційних зображеннях спостерігаються періодичні шумові структури з частотою 0.58 Гц. Отримано спектри шумів для різних режимів передавання даних.

За время функционирования радиолокатора бокового обзора (РЛСБО), установленного на борту первого украинского ИСЗ «Січ-1» предназначенного для дистанционного зондирования Земли, был накоплен большой объем информации по различным районам Мирового океана. Кроме систематических съемок Черного и Азовского морей, проводились регулярные съемки регионов северной и северо-западной Атлантики, юго-восточной и западной частей Тихого океана, Карибского моря, района Антарктиды.

Характеристики РЛСБО (большая полоса обзора 450 км, достаточно высокое пространственное разрешение $1.8 \times 2.5 \text{ км}^2$) позволили решать целый ряд фундаментальных и прикладных задач. Краткий обзор основных явлений на морской поверхности, идентифицируемых по изображениям РЛСБО ИСЗ «Січ-1», приведен в работе [5]. В работах [2, 7] проанализированы РЛ проявления океанических температурных фронтов, традиционно связываемых в промысловой океанографии с зонами повышенной биопродуктивности. Характеристики ветра в прибрежной зоне, мезомасштабные особенности ветрового поля над Черным морем и особенности ледового покрытия в Азовском море, полученные по радиолокационным данным, рассмотрены в [3, 4].

По своим возможностям РЛСБО ИСЗ «Січ-1» представляла уникальную систему, позволяющую проводить съемки больших акваторий Мирового океана протяженностью в несколько тысяч кило-

метров и, что наиболее важно, оперативно получать данные на наземных пунктах приема информации. РЛСБО необходимо рассматривать как элемент международной космической наблюдательной системы, в которой выгодно сочетаются глобальность обзора поверхности моря и суши, присущая украинским РЛСБО, и детальность просмотра, обеспечиваемая зарубежными спутниковыми радиолокаторами высокого разрешения.

Учитывая, что на ИСЗ «Січ-1М» предполагается установка радиолокационной станции, аналогичной РЛСБО «Січ-1», актуальным становится вопрос о точностных характеристиках физических параметров, восстанавливаемых по РЛ-изображениям морской поверхности, и возможности сопоставления информации, получаемой с различных спутников.

Целью данной работы является рассмотрение характеристик шумов РЛСБО и оценка их вклада в погрешность радиолокационных измерений.

В работах [2, 3, 7] анализ гидрологических и метеорологических характеристик проводился по рассчитанным значениям σ^0 удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) морской поверхности. Это позволило сопоставить результаты измерений, полученные по РЛ-изображениям с физическими моделями и интерпретировать дистанционные данные.

Точность расчета величины σ^0 определяется как минимум двумя факторами. С одной стороны, необходим учет характеристик шумов всего тракта от

приема отраженного сигнала на борту ИСЗ до наземного пункта приема и обработки космической информации. С другой стороны, при расчете σ^0 должны учитываться характеристики приемного тракта РЛС, в частности величина коэффициента усиления и закон его изменения, значения градаций калибровочного клина, приведенные в [1]. При обработке информации РЛСБО ИСЗ «Січ-1» наблюдалось некоторое несоответствие между исходными данными на комплекс аппаратуры [1] и реальными характеристиками РЛ-сигнала. В качестве примера можно привести результаты, полученные в [6]. Для режима работы записи/воспроизведения информации 2ви-м/2зи3 в исходных РЛ изображениях «уровень черного» a_0 в калибровочном клине был смещен относительно «электрического нуля». Для режима непосредственной передачи смещения a_0 не было. Отметим, что закон изменения коэффициента усиления приемного тракта по строкам кадра отличался от линейного [6].

Строго говоря, рассчитанное по РЛ-изображению значение σ^0 является смещенной оценкой УЭПР морской поверхности. Это связано с тем, что в РЛСБО ИСЗ «Січ-1» при формировании калибровочного клина не учитывалась часть волноводного тракта и влияние конструкции спутника на характеристики антенной системы. Ниже под σ^0 будем понимать именно эту смещенную оценку УЭПР.

Поскольку существуют особенности принимаемых РЛ-данных при различных режимах работы бортового радиотехнического комплекса [6], анализ шумовых характеристик проведем для двух режимов: нп-рпм5 и 2ви-м/2зи3. Для режима непосредственной передачи нами отобраны 28 РЛ-изображений, переданных с 13.01.96 по 31.10.96 и 28 РЛ-изображений для режима записи/воспроизведения информации, переданных с 03.02.96 по 30.11.96 г. Прием информации РЛСБО, передаваемой по радиолинии метрового диапазона радиоволн, осуществлялся непосредственно в МГИ НАН Украины с помощью приемной станции «Vaisala», имеющей уровень шумов существенно ниже младшего разряда квантования принимаемого сигнала. Оцифровка принимаемого сигнала осуществлялась 8-разрядным АЦП.

Рассмотрим характеристики шумов в РЛ изображениях, переданных с борта ИСЗ «Січ-1» с февраля по декабрь 1996 г. Предварительную оценку шумов удобно проводить по градациям калибровочного клина, в котором нет естественных флуктуаций принятого рассеянного обратного сигнала. На рис. 1 показано изменение уровня сигнала U в калибровочном клине по строкам n_j кадра РЛ-изо-

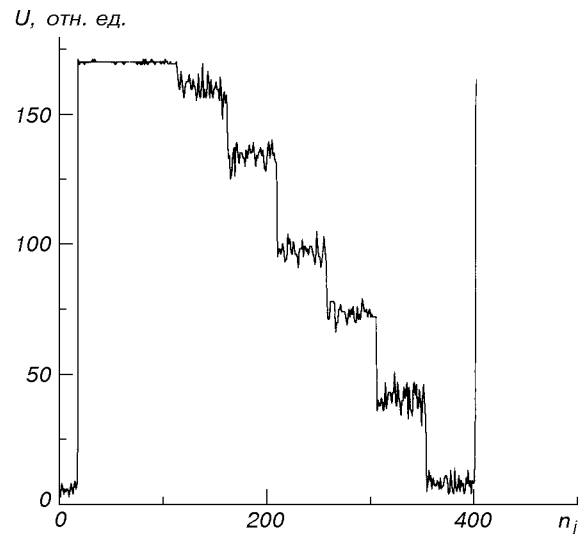


Рис. 1. Изменение уровня сигнала U в калибровочном клине по строкам n_j кадра РЛ-изображения, принятого на витке 5823. Первая градация соответствует «уровню белого», восьмая — «уровню черного» [1]

бражения, принятого на витке 5823 (режим нп-рпм5). Сигнал в 3-й—8-й градациях калибровочного клина имеет хорошо выраженную шумовую структуру. Обращает на себя внимание ограничение на 1-й и 2-й градациях, вызванное тем, что в период функционирования РЛСБО ИСЗ «Січ-1» с целью повышения «информационной» чувствительности коэффициент усиления приемника K , за редкими исключениями, имел максимальное значение $K = 7$. Практическое отсутствие шумов на «уровне белого» указывает на то, что после каскада усиления остальные функциональные узлы приемной части РЛСБО и передатчика РТВК шумов в информационный сигнал практически не вносили.

На рис. 2 представлены средние модули амплитуд шумов A_n и их средние квадратичные отклонения σA_n в 4-й—8-й градациях уровней калибровочного клина G_p ($p = 4...8$) для режимов нп-рпм5 (рис. 2, а и б) и 2ви-м/2зи3 (рис. 2, в и г). Амплитуды шумов для режима непосредственной передачи оказываются несколько ниже, чем для режима записи/воспроизведения информации. Для обоих случаев величины A_n максимальны на «уровне черного» и 7-й градации клина. Данный эффект связан с тем, что наклон кривой $U = f(G)$ максимален в диапазоне 8-й—7-й градаций клина и уменьшается к «уровню белого». При проведении нормализации РЛ-изображения это приводит к тому, что одни и те же значения амплитуды шумов в исходных данных имеют различные значения в децибелах в зависимости от уровня среднего сигнала.

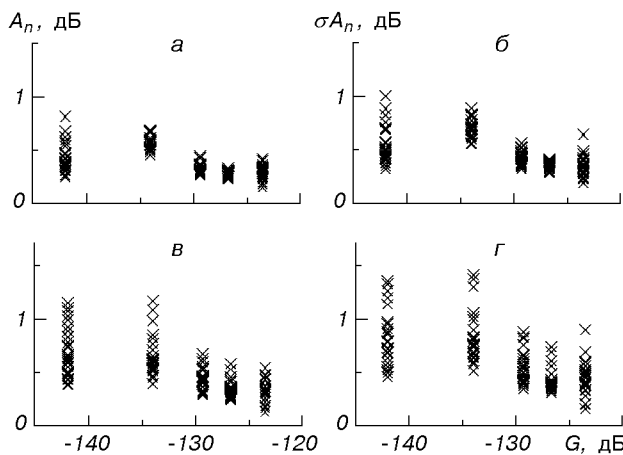


Рис. 2. Средние значения модулей амплитуд шумов A_n и их средние квадратичные отклонения σA_n в 4-й—8-й градациях уровней калибровочного клина: а, б — для режима нп-рпм5; в, г — для режима 2ви-м/2зи3

Как следует из рис. 2, средние квадратичные отклонения шумов в режиме непосредственной передачи (рис. 2, б) также меньше, чем в режиме 2ви-м/2зи3 (рис. 2, в) и в 4-й—7-й градациях калибровочного клина достигают соответственно 0.5—1 дБ и 0.5—1.5 дБ.

При расчете σ^0 по РЛ-изображениям морской поверхности наличие шумов сигнала A_n приводит к ошибке определения УЭПР $\Delta\sigma^0$. Оценим ее. Если рассеянная обратно (или отраженная) мощность на входе приемника РЛСБО составляет P_0 , а пересчитанное с учетом клина и коэффициента усиления значение сигнала в РЛ-изображении при отсутствии шумов равно D_0 , то $P_0 = \exp[M \cdot D_0]$, где $M = 0.11 \ln 10$. Шумы A_n смещают рассчитываемые по РЛ-данным значения P :

$$P = \exp[M \cdot (G + A_n)] = P_0 \exp(M \cdot A_n).$$

Учитывая, что $P_0 \sim \sigma^0$, погрешность $\Delta\sigma^0$ можно записать в виде

$$\Delta\sigma^0 \approx P - P_0 = P_0 [\exp(M \cdot A_n) - 1]. \quad (1)$$

Из последнего выражения следует, что величина $\Delta\sigma^0$ зависит также и от уровня принимаемого радиолокационного сигнала.

Одной из основных задач, решаемых с помощью РЛСБО, является определение модуля скорости приводного ветра W . В рамках резонансной модели рассеяния при заданных параметрах наблюдения величина σ^0 зависит от уровня спектра брегговской ряби, зависящего в первую очередь от W . Следовательно, ошибка измерения УЭПР морской поверх-

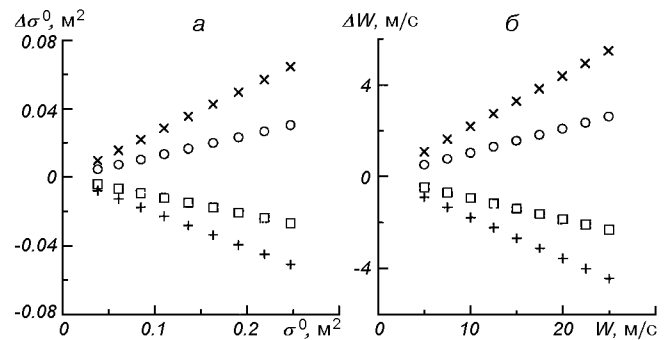


Рис. 3. Зависимости погрешностей УЭПР морской поверхности σ^0 и скорости ветра W , вызванных шумами канала РЛСБО, от рассчитанных по РЛ-данным значений физических величин для амплитуд шума: $A_n = 1$ дБ (косые крестики), 0.5 дБ (кружки), -0.5 дБ (квадратики), -1 дБ (прямые крестики)

ности $\Delta\sigma^0$ приводит к погрешности ΔW при расчете скорости ветра. Для оценки величины ΔW воспользуемся результатами работы [6], в которой по данным РЛСБО ИСЗ «Січ-1» получена экспериментальная ветровая зависимость УЭПР морской поверхности

$$\sigma^0 = 0.00578W^{1.167}. \quad (2)$$

Используя (2) и исходные данные на «Січ-1» [1], нетрудно показать, что при изменении W от 4 м/с до 25 м/с принимаемый уровень РЛ-сигнала будет изменяться от $G = -132$ до -125 дБ.

Таким образом, для наблюдаемых в реальных условиях ветров значения величины G соответствуют 4-й—7-й градациям калибровочного клина. Оценку величины ΔW запишем в виде

$$\Delta W = W(G) - W(G + A_n), \quad (3)$$

где $W(G)$ и $W(G + A_n)$ — рассчитанные по РЛ-данным скорости ветра без учета шумов и с учетом величины A_n соответственно. На рис. 3 показаны зависимости $\Delta\sigma^0$ от σ^0 и ΔW от скорости ветра для $A_n = \pm 0.5$ дБ и $A_n = \pm 1$ дБ. При вычислениях использовались соотношения (1)—(3), а расчет σ^0 проводился по методике, описанной в [6]. Как следует из рис. 3, наличие шумов бортовой аппаратуры приводит к ошибке расчета УЭПР морской поверхности и скорости ветра около 10 % при $|A_n| = 0.5$ дБ и 20 % при $|A_n| = 1$ дБ. Здесь важно подчеркнуть два момента. Во-первых, показанные на рис. 2 модули величин A_n относятся к калибровочному клину, и следовательно, при их определении нет коррекции на коэффициент усиления ($K = 1$). Учет K при нормализации РЛ-информации приводит к уменьшению значений шумов.

Таким образом, полученные оценки A_n являются максимальными для РЛ-данных и относятся к первым пикселям строк изображений. С другой стороны, анализ информации о структуре поля приводного ветра проводится на метеорологических мезо- и синоптических масштабах, составляющих 10—100 км. В этом случае целесообразно выполнение пространственного усреднения РЛ-данных, что дополнительно снижает вклад шумов бортовой аппаратуры в информационном сигнале.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМОВ

Для определения спектрального состава шумов РЛСБО воспользуемся кадрами, в которых полностью отсутствует информационный сигнал и представляющими собой, по сути, запись шумов всего тракта формирования, преобразования и передачи сигнала.

На рис. 4 в качестве примера показан фрагмент РЛ-кадра, принятого на витке 6358. Для лучшей наглядности из исходных данных вычтен тренд среднего уровня сигнала по строке, обусловленный изменением коэффициента усиления K . Особенностью изображения являются полосы «волнообразных» структур. Отметим, что подобные эффекты наблюдались и на ряде изображений РЛСБО ИСЗ «Океан-1 № 7», принятых на пункте приема НПО «Планета» (г. Долгопрудный) по каналу 465 Мгц в 1995—1996 гг.

Для расчета спектральных характеристик шумов РЛСБО нами были взяты фрагменты изображений, переданных на витках 6358 (режим нп-рпм5), 6343 и 6806 (режим 2ви-м/2зи3). Фрагмент изображения 6343 имел размер 512 строк \times 575 колонок, а изображения 6343, 6806 — 512 строк \times 190 колонок. Учитывая, что частота строк изображения составляет 0.25 Гц [1], временной интервал реализаций по колонкам изображений составил $T = 128$ с. Расчет спектров производился методом БПФ по реализациям данных вдоль каждой строки $S_i^r(f)$ и по колонкам кадров $S_i^c(f)$, где i, j — соответственно номера колонок и строк в выбранных фрагментах РЛ-кадров. Результирующие спектры представляли средние значения спектров $S_i^r(f)$ и $S_i^c(f)$, нормированные на дисперсии σ_j^2, σ_i^2 для соответствующей реализации:

$$S^r(f) = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_j} S_j^r(f)(\sigma_j^2)^{-1},$$

$$S^c(f) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} S_i^c(f)(\sigma_i^2)^{-1},$$

где N_j, N_i — количество осредняемых реализаций. Результат расчетов спектров шумов канала РЛСБО представлен на рис. 5. Как видно из рис. 5, *a*, для обоих режимов работы в спектрах $S^r(f)$ на частоте $f \approx 0.58$ Гц наблюдается пик, что соответствует периоду колебаний 1.73 с. Этот пик вызван наличием «волнообразных» шумовых структур. В ос-

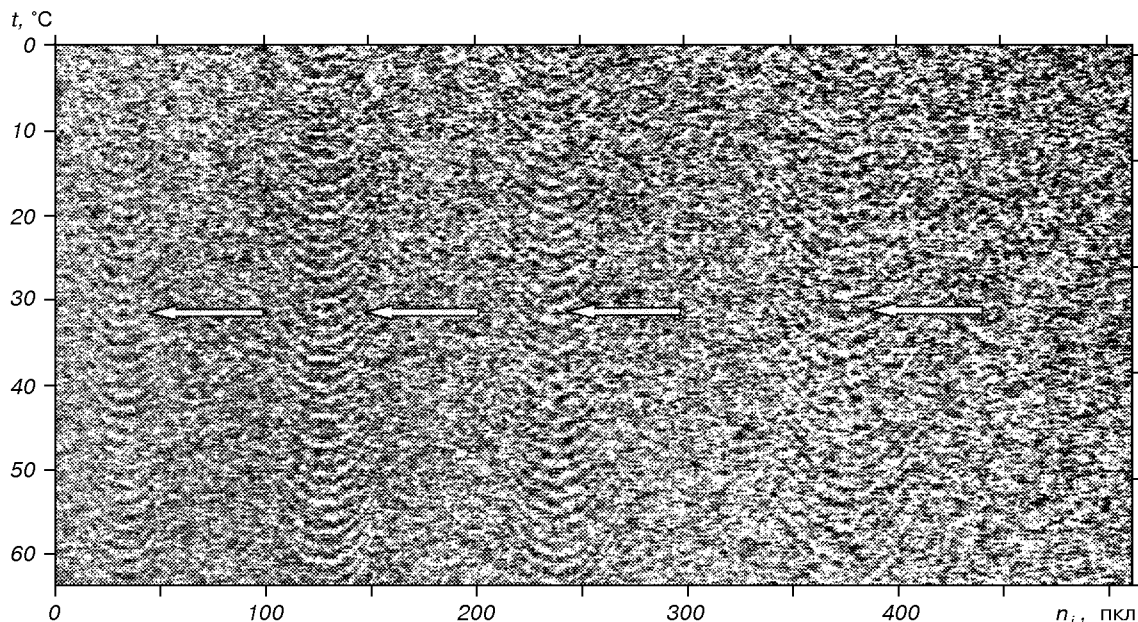


Рис. 4. Фрагмент РЛ-кадра, принятого на витке 6358. По оси абсцисс номер пикселя n по строкам кадра, по оси ординат — время. Стрелки указывают на волнообразные структуры в шумовом сигнале

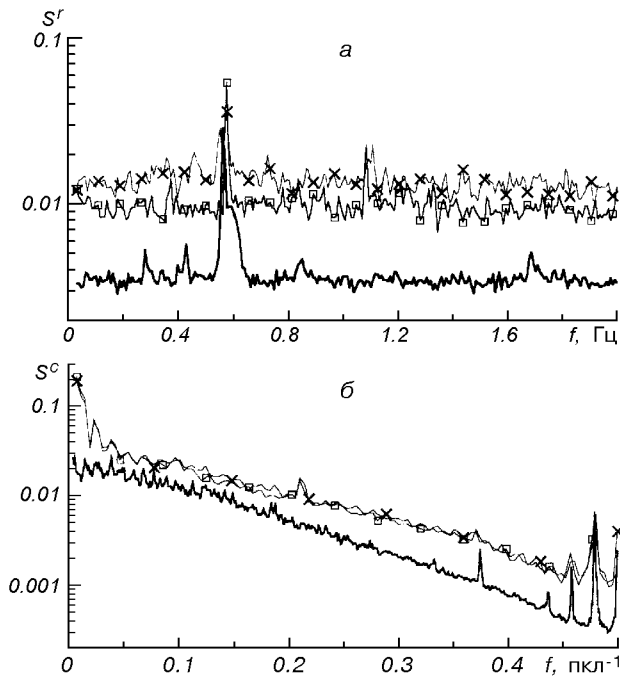


Рис. 5. Спектры шумов канала РЛСБО: *a* — по колонкам кадра, *b* — по строкам кадра. Сплошная линия — расчет по данным, принятым на витке 6358 (режим непосредственной передачи), крестики — 6343, кружки — на витке 6806 (режим 2ви-м/2зи3)

тальной частотной области спектры имеют практически постоянный уровень. Обратим внимание на тот факт, что для режима нп-рпм5 уровень $S^r(f)$ вне пика приблизительно в 3—4 раза ниже уровня спектра для режима 2ви-м/2зи3.

Иной характер имеют спектры РЛ-сигнала вдоль строк изображений, представленные на рис. 5, б. Для обоих режимов спектры имеют спадающий характер и близки к экспоненциальной функции $S^c(f) = a \exp(-bf)$. Наклон спектра шумов для режима непосредственной передачи несколько больше, чем для режима запись/воспроизведение информации. Коэффициенты a , b определялись методом минимального квадрата ошибки и с учетом их численных значений спектры $S^c(f)$ могут быть записаны в виде

$$S^c(f) = 0.03 \exp(-8.81f) \quad \text{для режима нп-рпм5}$$

$$S^c(f) = 0.06 \exp(-8.20f) \quad \text{для режима 2ви-м/2зи3}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информация, получаемая с помощью РЛСБО ИСЗ «Сіс-1», позволяет с достаточно высокой точностью

восстанавливать значения УЭПР морской поверхности. Шумы бортовой аппаратуры дают погрешность при определении σ^0 и модуля скорости приводного ветра 10—20 %. Эта оценка, относящаяся к началу строк РЛ-изображений, является максимальной и может быть уменьшена путем пространственного усреднения РЛ-данных при анализе мезомасштабных атмосферных и океанических процессов. Спектральный анализ шумового сигнала показал, что в кадре передаваемой с борта ИСЗ информации содержатся колебания с периодом 1.73 с. Полученные эмпирические спектры шумов вдоль строк и колонок изображений необходимо учитывать при интерпретации естественных пространственных вариаций УЭПР морской поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального космического агентства Украины (контракты № 2-15/00-МГИ и № 2-15/00-ДВС).

1. Исходные данные на прием и обработку информации дистанционного зондирования Земли от КА «Сіс-1», передаваемой по радиоканалу 465 МГц, Сіс П.3792.703 ИД. — Днепропетровск, КБ «Южное», 1994.
2. Кудрявцев В. Н., Малиновский В. В., Родин А. В. Проявление температурных фронтов в радиолокационных изображениях океана // Исслед. Земли из космоса.—1999.— № 6.—С. 16—26.
3. Малиновский В. В., Пустовойтенко В. В. Радиолокационные наблюдения мезомасштабных особенностей приводного ветра // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАНУ, 1999.—С. 142—146.
4. Малиновский В. В., Пустовойтенко В. В., Кудрявцев В. Н. Использование информации РЛСБО ИСЗ «Сіс-1» для наблюдения Черного и Азовского морей // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАНУ, 1998.—С. 162—173.
5. Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ ІГН НАНУ, 1999.—262 с.
6. Пустовойтенко В. В., Малиновский В. В. Некоторые особенности обработки информации спутниковой радиолокационной станции бокового обзора ИСЗ «Сіс-1» // Морской гидрофиз. журн.—1998.— № 3.—С. 70—77.
7. Родин А. В., Кудрявцев В. Н., Малиновский В. В. Идентификация фронтальных разделов в океане по данным радиолокационного зондирования с ИСЗ серии «Океан»: Приложение к промысловой разведке рыб // Дистанционные методы мониторинга промысловых районов Мирового океана. — М.:ВНИРО, 1997.—С. 33—62.

NOISE PARAMETERS OF THE «SICH-1» SLR SYSTEM

V. V. Malinovsky and V. V. Pustovoytenko

We present the results of the study of noise parameters in the radar data from the «Sich-1» satellite. It is shown that the noise in the SLR system causes an error of about 10—20 % when calculating wind velocities. Noise wave structures with a frequency of 0.58 Hz are clearly visible in the radar images. The noise spectra for different operation modes were obtained.