

УДК 520.216

С.В. Доценко, профессор, д-р физ.-мат. наук; А.Л. Холод, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАЛИБРОВКИ ДИСТАНЦИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Получена теоретическая оценка погрешности восстановления спутниковых измерений температуры поверхности моря по результатам ее прямых измерений свободно-плавающими буйами – дрейфтерами.

Ключевые слова: калибровка, дистанционная система, дрейфтер, температура поверхности моря, погрешность.

Целью данной работы является изложение теоретических основ определения погрешности спутниковых измерений физических полей океана на основе сопоставления с контактными данными.

Дистанционное зондирование окружающей среды представляет собой совокупность методов измерения параметров физического состояния моря с помощью приборов, расположенных от него на некотором расстоянии. Использование в качестве носителя измерительной аппаратуры спутников Земли обеспечивает:

- осуществление глобальных наблюдений, в том числе и над труднодоступными регионами акватории океана;
- сбор, частичную обработку на борту и передачу глобальных данных в гидрометеорологические центры быстрее и дешевле по сравнению с наземными системами связи;
- практически мгновенное исследование морской поверхности.

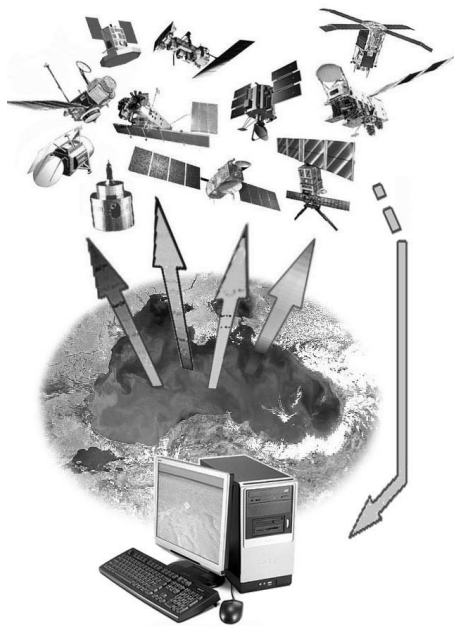


Рисунок 1 – Дистанционное зондирование Черного моря

Для оценки точности спутниковых измерений физических полей океана используются контактные измерения, проводимые непосредственно в море. В качестве основного инструмента, который служит этим целям, в настоящее время принят свободно-плавающий буй – дрейфтер. Дрейфтер имеет вертикальный подводный парус цилиндрической формы с центром действия на глубине 15 м, сопротивление которого примерно в 40 раз больше, чем у связанного с ним поверхностного поплавка вместе с тросовой линией. Таким образом, влияние поверхностных волн и дрейфовых течений на горизонтальное перемещение дрейфтеров не является существенным, так как дрейфтер переносится с водной массой, окружающей его парус. Датчик приповерхностной температуры у этих дрейфтеров расположен на глубине 0,2...0,25 м от поверхности моря. Посредством передатчика и антенны, расположенных в поверхностном поплавке, осуществляется связь дрейфтера со спутниками системы «Аргос» и производится определение местоположения дрейфтеров с разрешением не хуже несколько

сотен метров. Кроме того, на спутник передается как техническая, так и полученная им научная информация. Со спутника вся эта информация поступает в центр приема данных, а оттуда – потребителям либо напрямую, либо через глобальную телеметрическую сеть, существующую в рамках Всемирной Метеорологической организации.

При сопоставлении спутниковой температуры поверхности моря (ТПМ) с данными дрейфтеров возникает ряд проблем, которые изучались на протяжении последних четырех десятилетий и продолжают изучаться в настоящее время. К их числу относят пространственно-временную рассогласованность спутниковых и контактных данных, возникающую из-за различия физических принципов измерений, отличия между дистанционными ТПМ, полученными с различных спутниковых платформ, влияния ошибок распознавания облачных ситуаций и сбоев в информации ТПМ по спутниковым данным, а также погрешностей контактных измерений. Эффекты пространственно-временной рассогласованности измерений связаны с несинхронностью дистанционной и контактной съемки, пространственной несовместимостью поля зрения ИК-радиометра и точки локализации дрейфтера, конечными размерами элемента разрешения радиометра по сравнению с точечным у дрейфтеров, разницей в эффективной глубине измерений для спутниковых ТПМ (до 100 мкм) и глубине, на которой выполняются контактные измерения (0,2–1 м).

В настоящей работе ограничимся исследованием влияния несоответствия результатов сопоставления дистанционных и контактных измерений в силу эффекта осреднения поля дистанционным прибором и несовпадения положения дрейфтера и центра разрешения дистанционного прибора. Сравнение результатов дистанционного измерения поля с данными его контактных измерений будем называть калибровкой. Именно калибровка теоретически исследуется в данной работе. Остальные негативные эффекты, перечисленные выше, ухудшают результаты этих расчетов и должны исследоваться иными методами.

Для решения поставленной задачи найдем погрешность сопоставления результатов точечных измерений температуры поверхности моря аппаратурой дрейфтеров и данных ТПМ, полученных с помощью ИК-сканера спутника, при оптимальной обработке результатов измерений.

ИК-сканер измеряет яркостную температуру поверхности моря. Функцию перехода от яркостной температуры к термодинамической будем считать известной. Осреднение ТПМ сканером производится по времени и по пространству. Ограничимся осреднением по пространству. Рассмотрим рисунок 2. Пусть измерение температуры дрейфтером производится в точке А и считается эталоном измерений. Пунктиром изображена траектория движения спутника. Окружностью условно обозначена граница элемента разрешения сканера. Результат измерения температуры поверхности моря ИК-сканером припишем точке О, которую будем считать центром элемента разрешения сканера. В общем случае точки А и О не совпадают. При их совпадении спутник точно проходит над дрейфтером. Модуль вектора $\vec{r}$, связывающего точки А и В, является кратчайшим расстоянием от точки А до точки О.

Обозначим через $X(\vec{r}_0)$ истинное значение поля ТПМ, измеренное дрейфтером; $Y(\vec{r})$ – значение поля, измеренное ИК-сканером спутника в точке, местоположение которой задается вектором $\vec{r}$ относительно точки О.

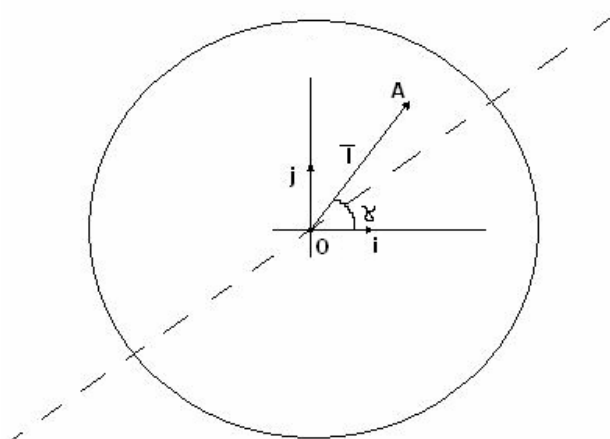


Рисунок 2 — Геометрия задачи

ИК-сканер направлен в надир и осуществляет осреднение поля ТПМ в соответствии с вещественной аппаратной функцией $h(\vec{p})$. Результат измерения им поля, соответствующий точке, задаваемой вектором $\vec{r}$, есть [1]

$$Y(\vec{r}) = \int X(\vec{r} - \vec{\rho}) h(\vec{\rho}) d\vec{\rho}. \quad (1)$$

Интегрирование в (1) производится по всему полю $X(\vec{x})$.

Допустим, что поле $X(\vec{x})$ стационарно и центрировано. Поэтому и связанное с ним поле $Y(\vec{r})$ также стационарно и центрировано. Результатом обработки поля, воспринимаемого сканером, является величина $\beta Y(\vec{r})$, где β – коэффициент усиления сигнала. Средний квадрат ошибки между $X(\vec{r}_0)$ и $\beta \cdot Y(\vec{r})$ можно найти по формуле:

$$\epsilon^2 = M[\{\beta Y(\vec{r}) - X(\vec{r}_0)\}^2],$$

или в развернутом виде

$$\epsilon^2 = M[X^2(\vec{r}_0)] - 2\beta M[Y(\vec{r})X(\vec{r}_0)] + \beta^2 M[Y^2(\vec{r})]. \quad (2)$$

Очевидно, что первое слагаемое этого выражения $M[X^2(\vec{r}_0)] = \sigma_x^2$ есть дисперсия поля X .

Вычислим входящее в (2) второе слагаемое

$$M[Y(\vec{r})X(\vec{r}_0)] = \int M[X(\vec{r} - \vec{\rho})X(\vec{r}_0)]h(\vec{\rho})d\vec{\rho}.$$

В силу статистической однородности поля X входящая под знак интеграла функция есть:

$$M[X(\vec{r} - \vec{\rho})X(\vec{r}_0)] = B(\vec{r} - \vec{r}_0 - \vec{\rho}) = B(\vec{l} - \vec{\rho}),$$

где $B(\vec{r})$ – пространственная корреляционная функция измеряемого поля, а $\vec{l}$ – радиус-вектор, соединяющий положение дрифтера и центр элемента разрешения сканера. Поэтому

$$M[Y(\vec{r})X(\vec{r}_0)] = \int B(\vec{l} - \vec{\rho})h(\vec{\rho})d\vec{\rho}. \quad (3)$$

Далее преобразуем третье слагаемое формулы (2):

$$M[Y^2(\vec{r})] = M\left[\int X(\vec{r} - \vec{\rho}_1)h(\vec{\rho}_1)d\vec{\rho}_1 \cdot \int X(\vec{r} - \vec{\rho}_2)h(\vec{\rho}_2)d\vec{\rho}_2\right] = \iint M[X(\vec{r} - \vec{\rho}_1)X(\vec{r} - \vec{\rho}_2)]h(\vec{\rho}_1)h(\vec{\rho}_2)d\vec{\rho}_1d\vec{\rho}_2,$$

откуда получаем

$$M[Y^2(\vec{r})] = \iint B(\vec{\rho}_2 - \vec{\rho}_1)h(\vec{\rho}_1)h(\vec{\rho}_2)d\vec{\rho}_1d\vec{\rho}_2. \quad (4)$$

Третье слагаемое, как и первое, не зависит от $\vec{l}$.

Наиболее просто найденные соотношения записываются в спектральной области. Случайное однородное поле, зависящее от двух пространственных координат и характеризуемое корреляционной функцией $B(\vec{r})$, согласно двумерной теореме Виннера-Хинчина, можно представить в виде двумерного интеграла Фурье[2]:

$$B(\vec{r}) = \int e^{j\vec{\alpha} \cdot \vec{r}} G_2(\vec{\alpha}) d\vec{\alpha}, \quad (5)$$

где $\vec{\alpha}$ – двумерный вектор в волновом пространстве (волновой вектор), $G_2(\vec{\alpha})$ – двумерная спектральная плотность (двумерный энергетический спектр) поля.

Интегрирование производится по всему пространству волновых векторов. В частности, $B(0) = \sigma_x^2 = \int G_2(\vec{\alpha}) d\vec{\alpha}$ есть дисперсия поля. Подставляя (5) в (3) и интегрируя по ρ , получаем

$$M[Y(\vec{r})X(\vec{r}_0)] = \int \tilde{h}(\vec{\alpha}) e^{j\vec{\alpha} \cdot \vec{l}} G_2(\vec{\alpha}) d\vec{\alpha},$$

где комплексная функция

$$\tilde{h}(\vec{\alpha}) = \int h(\vec{\rho}) e^{-j\vec{\alpha} \cdot \vec{\rho}} d\vec{\rho} \quad (6)$$

– двумерная спектральная характеристика ИК-сканера.

Аналогично слагаемое (4) можно преобразовать к виду $M[Y^2(\vec{r})] = \int |\tilde{h}(\vec{\alpha})|^2 G_2(\vec{\alpha}) d\vec{\alpha}$.

Будем считать, что аппаратная функция обладает радиально симметрией, т.е. $h(\vec{\rho})$ зависит только от $|\vec{\rho}| = \rho$ и не зависит от азимута ϕ . Кроме того, предположим, что измеряемое поле изотропно. Это означает, что его спектр зависит от модуля волнового вектора $G_2(\vec{\alpha}) = G_2(|\vec{\alpha}|) = G_2(\alpha)$. При этом переход в найденных интегралах к полярной системе координат существенно упрощает полученные выражения.

Вначале найдем спектр аппаратной функции (6). В полярных координатах имеем:

$$\vec{\rho} = \rho_1 \vec{i} + \rho_2 \vec{j}; \quad \vec{\alpha} = \alpha_1 \vec{i} + \alpha_2 \vec{j},$$

где $\vec{i}, \vec{j}$ – единичные орты (рисунок 2), проекции на них радиус-вектора и волнового вектора, равные соответственно $\rho_1 = \rho \cos \varphi$, $\rho_2 = \rho \sin \varphi$, $\alpha_1 = \alpha \cos \theta$, $\alpha_2 = \alpha \sin \theta$.

Здесь ρ – радиус-вектор, α – волновое число, φ, θ – азимут и $d\vec{\rho} = \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi$, $d\vec{\alpha} = \alpha \cdot d\alpha \cdot d\theta$. При этом из формулы (6) имеем

$$\tilde{h}(\vec{\alpha}) = \int_{\rho=0}^{\infty} \int_{\varphi=0}^{2\pi} h(\rho) e^{-j\alpha \cdot \rho \cdot \cos(\varphi-\theta)} \rho d\rho d\varphi.$$

Входящий в полученное выражение интеграл имеет значение [3]

$$\int_0^{2\pi} h(\rho) e^{-j\alpha \cdot \rho \cdot \cos(\varphi-\theta)} d\varphi = 2\pi J_0(\alpha\rho),$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Следовательно, спектральная характеристика сканера $\tilde{h}(\vec{\alpha})$ представляет собой вещественную функцию волнового числа α :

$$\tilde{h}(\alpha) = 2\pi \int_0^{\infty} h(\rho) J_0(\alpha\rho) \rho d\rho.$$

Упрощая подобным образом остальные интегралы с учетом изотропности поля, получаем:

$$\sigma_x^2 = \int G_2(\vec{\alpha}) d\vec{\alpha} = 2\pi \int_{\alpha=0}^{\infty} G_2(\alpha) \alpha d\alpha;$$

$$M[Y(\vec{r}) X(\vec{r}_0)] = 2\pi \int_{\alpha=0}^{\infty} \tilde{h}_2(\alpha) J_0(\alpha l) G_2(\alpha) \alpha d\alpha;$$

$$M[Y^2(\vec{r})] = 2\pi \int_{\alpha=0}^{\infty} |\tilde{h}_2(\alpha)|^2 G_2(\alpha) \alpha d\alpha.$$

Подстановка этих значений в формулу (2) дает

$$\varepsilon^2 = 2\pi \int_0^{\infty} [1 - 2\beta \tilde{h}_2(\alpha) J_0(\alpha l) + \beta^2 \tilde{h}_2^2(\alpha)] G_2(\alpha) \alpha d\alpha. \quad (7)$$

Преобразуем выражение, стоящее в прямых скобках этой формулы к виду

$$1 - 2\beta \tilde{h}_2(\alpha) J_0(\alpha l) + \beta^2 \tilde{h}_2^2(\alpha) = (1 - \beta \tilde{h}_2(\alpha))^2 + 2\beta [1 - J_0(\alpha l)] \tilde{h}_2(\alpha)$$

Тогда (7) можно записать как

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2, \quad (8)$$

где

$$\varepsilon_1^2 = 2\pi \int_0^{\infty} [1 - \tilde{H}_2(\alpha)]^2 G_2(\alpha) \alpha d\alpha; \quad (9)$$

$$\varepsilon_2^2 = 4\pi \int_0^{\infty} [1 - J_0(\alpha l)] \tilde{H}_2(\alpha) G_2(\alpha) \alpha d\alpha. \quad (10)$$

и обозначена как $\tilde{H}_2(\alpha) = \beta \tilde{h}_2(\alpha)$ нормированная спектральная характеристика сканера.

Формулы (8), (9) и (10) являются основой теоретических расчетов для вычисления погрешности при сопоставлении точечных измерений дрифтера и поля, полученного дистанционным методом.

Как видно из формулы (8), общая погрешность сопоставления имеет две составляющие. Выражение (9) определяет ошибку, связанную осреднением поля ТПМ дистанционным прибором и зависит от аппаратной функции прибора и статистической структуры поля. Выражение (10) определяет ошибку, связанную с величиной пространственной несовместности центра элемента разрешения сканера и точки локализации дрифтера. При их совпадении имеем $l = 0, J_0(0) = 1$ и $\varepsilon_2^2 = 0$.

Таким образом, зная спектральные свойства поля, вид аппаратной функции дистанционного прибора и расстояние между положением дрефтера и центром элемента разрешения дистанционного датчика, можно найти обе составляющие погрешности и оценить степень достоверности дистанционных измерений.

В перспективе планируется найти оценку погрешности калибровки дистанционной измерительной системы путем подстановки реальных данных.

Библиографический список

1. Доценко С.В. Случайные процессы в гидрофизических измерениях / С.В. Доценко. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. — 239 с.
2. Монин А.С. Статистическая гидромеханика. Ч. 2. / А.С. Монин, А.М. Яглом. — М.: Наука, 1967. — 720 с.
3. Грандштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. / И.С. Грандштейн, И.М. Рыжик. — М.: Наука, 1971. — 1108 с.

Поступила в редакцию 24.03.2009 г.