

Потенциальные точностные характеристики многочастотного радиointерферометра малого космического аппарата

Хейн Тхура Аунг, А.И. Баскаков

*Национальный Исследовательский Университет (МЭИ), г. Москва, Россия
heinthuraung@gmail.com*

Получены потенциальные точностные характеристики оценки степени взволнованности морской поверхности (ординат морских волн) с борта космического аппарата по взаимной многочастотной корреляционной функции отраженных сигналов. Показано, что реализовать высокую точность измерений высоты морских волн во всем возможном диапазоне балльности морской поверхности можно при синтезировании апертуры антенны и использовании антенной решетки.

The report received potential accuracy characteristics of the sea surface intensity assessment (ordinate sea waves) of the spacecraft by multifrequency cross-correlation function of reflected signals. Realize the high accuracy measurement of ocean waveheight for all possible ranges of the sea surface intensity by synthesizing aperture antenna and using an antenna array.

Введение

Космические средства позволяют регулярно получать океанологическую информацию с огромных территорий и в настоящее время стали важнейшими источниками информации об океане наряду с судовыми и другими контактными исследованиями. Информация о состоянии морской поверхности (МП) - степени взволнованности необходима для повышения достоверности прогноза погоды на континентах и морях, для океанологических научных исследований, для обеспечения морской навигации, для строительства и эксплуатации различных гидротехнических сооружений (например, буровых вышек и портов), для экологического мониторинга и т.д.

Возможность оценки ординат морских волн по двухчастотной корреляционной функции (ДЧКФ) отраженного сигнала хорошо известна [1], [2], [3], [4] однако, до сих пор этот метод применялся только для относительно небольшой высоты полета, когда носителем радиолокатора являлся вертолет или самолет. С ростом высоты облучения поверхности значительно возрастает значение декоррелирующего множителя коэффициента корреляции, связанное с увеличением размеров облучаемой на МП области, и чувствительность ДЧКФ к высоте морских волн резко падает. В связи с этим использование известного способа оценки ординат морских волн по ДЧКФ с борта космического аппарата (КА) становится невозможным. В работах [5] показано, что введение режима синтеза апертуры антенны двухчастотного радиointерферометра позволяет: а) существенно повысить чувствительность двухчастотного коэффициента корреляции к степени взволнованности МП, что особенно важно при зондировании с борта КА; б) заметно уменьшить влияние декоррелирующего множителя на величину двухчастотного коэффициента корреляции до двух и более раз, причем тем больше, чем больше выбран разнос частот для повышения относительной чувствительности двухчастотного коэффициента корреляции к ординатам морских волн.

Требование иметь малую ширину ДНА тем не менее сохраняется, т.е. сужая луч при одном и том же разнесе частот (т.е. увеличивая размер антенны или укорачивая длину волны) можно значительно увеличить абсолютную величину коэффициента корреляции. Это объясняется тем, что синтез апертуры позволяет сузить диаграмму антенны только по одной координате вдоль линии пути. В поперечном направлении размер облучаемой на МП области остается неизменным. В работе [6] показано, что карди-

нальный путь исключения влияния декоррелирующего множителя на двухчастотный коэффициент корреляции - создание интерферометрической приемной антенны в плоскости перпендикулярной направлению полета. Однако, остается вопрос о предельных точностных характеристиках оценки ординат морских волн по ДЧКФ эхо-сигналов космического СВЧ радиоинтерферометра. Многочастотный режим космического радиоинтерферометра [7] позволяет получить примерно одинаковую чувствительность на сильном и слабом волнении МП для значений разностей рабочих частот - 60; 24; 12; 6 МГц при синтезировании апертуры антенны и использовании антенной решетки.

Потенциальная точность метода

Необходимо учесть влияние собственных шумов радиоприемного устройства, тогда комплексную амплитуду смеси сигнала с шумом на каждой из частот можно представить как

$$\dot{Y}_{1,2} = \dot{U}_{1,2} + N_{1,2} \quad (1)$$

Тогда, при условии, что сигнал и шум некоррелированы, выражение для комплексного двухчастотного коэффициента корреляции принимает вид

$$\rho_{\Sigma}(\sigma_h) = \frac{\overline{(\dot{U}_1 + \dot{N}_1)^* (\dot{U}_2 + \dot{N}_2)}}{\sqrt{\overline{|\dot{U}_1 + \dot{N}_1|^2} \overline{|\dot{U}_2 + \dot{N}_2|^2}}} = \frac{q_1 q_2}{\sqrt{(1+q_1^2)(1+q_2^2)}} \cdot \rho_c \cdot e^{j\Psi_c} \quad (2)$$

где $\overline{N_1 \cdot N_2} = \frac{N_0}{2} \cdot \delta(\Delta\omega)$, если $\Delta\omega \neq 0$, иначе $\overline{N_1 \cdot N_2} = 0$, ρ_c - сигнальная составляющая коэффициента корреляции. При относительно небольших значениях разности частот $\Delta\omega$ отношения сигнал/шум в каждом частотном канале очень близки $q_1 \approx q_2 = q$, тогда получим

$$\rho_{\Sigma}(\sigma_h) = \left(\frac{q^2}{1+q^2} \right) \cdot \rho_c \cdot e^{j \cdot \Psi_c} \quad (3)$$

Поскольку в реальных условиях коэффициент корреляции – величина статистическая представляет интерес оценить потенциальную точность измерений ординат морских волн. Оценку σ_h можно проводить на интервале однородности морского волнения в открытом океане $L_{одн} \approx 100 - 200$ км [8]. Если интервал синтезирования ограничен временем «замороженности» МП $T_{снт} = t_{зам}$, то в пределах облучаемой на поверхности области уложится N независимых интервалов синтезирования, необходимых для осреднения. Итак, имеем вектор совместной обработки N независимых отсчетов на двух частотах. Каждый обрабатываемый отсчет состоит из пары комплексных амплитуд обработанных отраженных сигналов совместно с аддитивным шумом приемного устройства (белый шум) и записывается в виде двумерного вектора (для двух частот):

$$\mathbf{U}(n) = \begin{pmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \end{pmatrix}, \quad n = \overline{1, N} \quad (4)$$

Полный вектор \mathbf{U} размерностью $2 \cdot N$ содержит N пар сигналов:

$$\mathbf{U}^T = \| U_{11}, U_{21}, \dots, U_{1n}, U_{2n}, \dots, U_{1N}, U_{2N} \| \quad (5)$$

Вследствие независимости последовательных отсчетов ковариационная матрица данной выборки имеет блочно-диагональную структуру

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} \overline{\dot{\mathbf{U}} \dot{\mathbf{U}}^*} = \frac{1}{2} \cdot \begin{array}{|c} \dot{\mathbf{U}}_{11} \\ \dot{\mathbf{U}}_{21} \\ \dot{\mathbf{U}}_{12} \\ \dot{\mathbf{U}}_{22} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{\mathbf{U}}_{1N} \\ \dot{\mathbf{U}}_{2N} \end{array} \times \begin{array}{|c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \times \begin{array}{|c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \times \begin{array}{|c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} = \text{diag}[\mathbf{K}^{(1)}, \mathbf{K}^{(2)}, \dots, \mathbf{K}^{(n)}, \dots, \mathbf{K}^{(N)}] \quad (6)$$

где

$$\mathbf{K} = \begin{array}{|c|} \mathbf{K}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}^{(N)} \end{array}, \quad \mathbf{K}^{(n)} = \left\| \begin{array}{cc} \sigma_{1n}^2 & \sigma_{1n} \cdot \sigma_{2n} \cdot \rho_n \cdot \exp(j\Psi_n) \\ \sigma_{1n} \cdot \sigma_{2n} \cdot \rho_n \cdot \exp(-j\Psi_n) & \sigma_{2n}^2 \end{array} \right\|$$

При мало отличающихся частотах зондирующих сигналов дисперсии мгновенных значений сигналов $\sigma_{1n}^2 = \sigma_{2n}^2 = \sigma_n^2$. Комплексная форма N -мерного нормального распределения в матричной записи имеет вид

$$\mathbf{W}(\dot{\mathbf{U}}, \sigma_h) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\mathbf{K})}} \exp \left(-\frac{1}{2} \dot{\mathbf{U}} \mathbf{K}^{-1} \dot{\mathbf{U}} \right) \quad (7)$$

где σ_h – искомый параметр (среднеквадратичная ордината морских волн), $\dot{\mathbf{U}}$ - случайный $2N$ – мерный вектор вида (5). Для оценки потенциальной точности метода необходимо определить след произведения производных от сопряженной и обратной матриц :

$$\sigma_{\sigma_h}^2 = \frac{1}{-Sp \left(\frac{d\mathbf{K}^*}{d\sigma_h} \cdot \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{d\sigma_h} \right)} \quad (8)$$

Используя (8) получим выражение для потенциальной точности оценки степени взволнованности МП, т.е. точности оценки среднеквадратических ординат морских волн σ_h :

$$\sigma_{\sigma_h}^2 = \frac{1}{-Sp \sum_{n=1}^N \left\| \begin{array}{cc} \frac{(\rho_n^2)^2 [(1 + \rho_n^2) + 2\rho_n^2]}{(1 - \rho_n^2)^2} & - \frac{2(\rho_n^2)^2 \rho_n \exp^{-j\Psi_n}}{(1 - \rho_n^2)^2} \\ \frac{2(\rho_n^2)^2 \rho_n \exp^{j\Psi_n}}{(1 - \rho_n^2)^2} & - \frac{(\rho_n^2)^2 [(1 + \rho_n^2) + 2\rho_n^2]}{(1 - \rho_n^2)^2} \end{array} \right\|} = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{1 + \rho_n^2}{(1 - \rho_n^2)^2} \cdot \rho_n^2} \quad (9)$$

Из (9) с использованием (3) получим окончательное выражение для потенциальной точности

$$\sigma_{\sigma_h} = \frac{1 - (\rho(\sigma_h))^2}{4\Delta k^2 \rho(\sigma_h) \sqrt{2N(1 + (\rho(\sigma_h))^2)}} \quad (10)$$

где N - число независимых реализаций отраженных сигналов на интервале однородности МП, взятое для осреднения при вычислении значений двухчастотной корреляционной функции. При интерферометрической антенной решетке в плоскости, перпендикулярной направлению полета [6], в формуле (10) для $\rho(\sigma_h)$ следует воспользоваться зависимостью

$$\rho(\sigma_h) = \frac{\frac{\theta_{\text{ЭКВ}_1}}{\theta_{\text{ЭКВ}_2}} \cdot \exp(-2\Delta k^2 \sigma_h^2)}{\sqrt{\left(\frac{\theta_{\text{ЭКВ}_1}}{\theta_{\text{ЭКВ}_2}}\right)^4 + \left(\Delta k H \theta_{\text{ЭКВ}_1}^2\right)^2}} \cdot \frac{q^2}{(1 + q^2)}$$

где $\Delta\theta_X = \theta_A$ - ширина ДНА (ось ОХ - направление вдоль линии полета КА), ДНА вдоль оси ОУ (поперек линии полета КА) определяется множителем комбинирования

антенной решетки. Ширина ДНА вдоль оси ОХ, шире ДНА вдоль оси ОУ в $k_1 = \frac{\Delta\theta_X^2}{\Delta\theta_Y^2}$ раз, $a_{ш}$ - коэффициент шероховатости МП [3], [5],

$$\theta_{\text{ЭКВ}_1}^2 = \frac{a_{ш}^2 \Delta\theta_X^2}{5.5a_{ш}^2 + \Delta\theta_X^2}; \theta_{\text{ЭКВ}_2}^2 = \frac{a_{ш}^2 \Delta\theta_X^2}{5.5a_{ш}^2(1 + k_1) + \Delta\theta_X^2}.$$

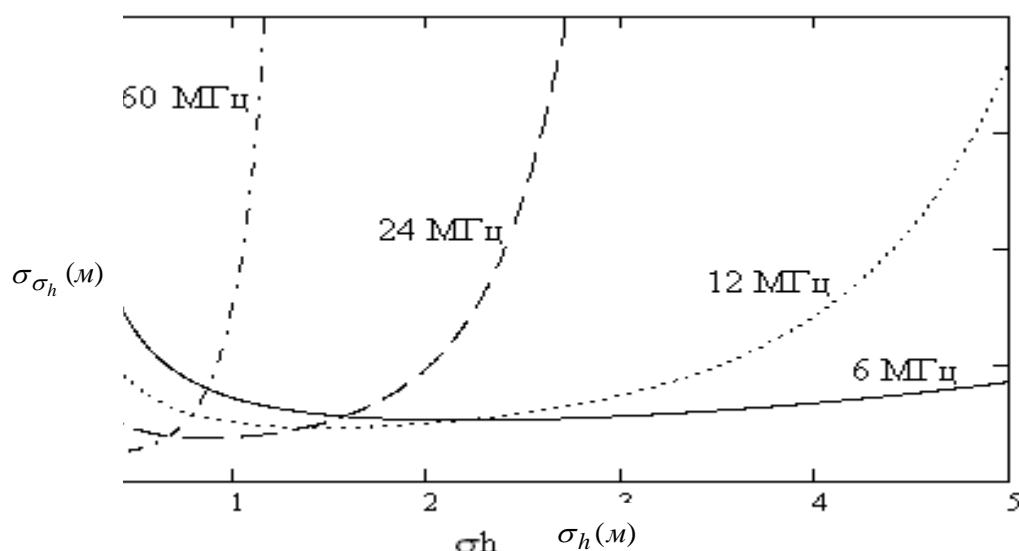


Рис.1. Зависимость точности измерения среднеквадратических ординат морских волн σ_h , при высоте полета $H=400$ км, $\lambda=0,86$ см, диаметр антенны - $d_a=0,3$ м, $\Delta f=6, 12, 24, 60$ МГц, отношение $c/\lambda - q=10$; 3 антенны в решетке, $d=0,35$ м, $k_1=6$

Заключение

Полученные результаты показали высокие точностные характеристики предложенного метода, и что особенно важно, в области слабого волнения МП, где получение высокой точности измерений ординат морских волн другими методами, например, со спутниковых высокоточных радиоальтиметров [8] представляется проблематичным. Кроме того, целесообразно использовать многочастотный режим облучения МП, при этом достаточно трех или четырех излучаемых частот для достижения примерно одинаковой чувствительности и высокой точности измерений высоты морских волн во всем возможном диапазоне балльности МП. Результаты расчетов показывают, что при $\lambda = 8.6$ мм реализована точность оценки ординат морских волн σ_{σ_h} не хуже 0,2м для слабого и среднего волнения, а для сильного волнения не хуже 0,3м. Небольшие требуемые габариты антенной системы и простота алгоритма обработки позволяют использовать данный радиолокатор на малом КА.

Литература

1. **Weissman D.E.** Two frequency radar interferometry applied to the measurement of ocean waveheight. – IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1973, vol. AP-21, №9, Sept.
2. **Weissman D.E., Jonson J.W.** Dual frequency correlation radar measurements of the height statistics of ocean waves. – IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1977, vol. AP-25, №1, Jan.
3. **Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С.** Радиолокация морской поверхности. – Ростов на Дону: Изд. Ростовского университета, 1978.
4. **Miller L.S.** The application of near-nadir Δk radar techniques to geodetic altimetry and oceanographic remote sensing. – IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1983, vol. GE-21, №1, Jan.
5. **Баскаков А.И., Мин-Хо Ка, Терехов В.А.** Оценка ординат морских волн по взаимной двухчастотной корреляционной функции отраженных сигналов при надирном синтезировании апертуры антенны. – Радиотехника, 2006, № 12.
6. **Хейн Тхура Аунг, Баскаков А.И.** Оценка потенциальной точности измерения морских волн по взаимной корреляционной функции. // Радиоэлектроника, электротехни-

ка и энергетика: восемнадцатая научнотех. конф. студентов и аспирантов: Тезисы докладов В 4-х т. Т. 1.- М.: Изд. дом МЭИ, 2012.

7. **Хейн Тхура Аунг, Баскаков А. И.** Использование зондирующего сигнала с угловой модуляцией в многочастотном радиоинтерферометре анализа состояния поверхности акваторий // Радиотехнические тетради № 44, 2011.

8. **Загородников А.А.** Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978.

9. **Мин-Хо Ка, Баскаков А.И.** Выбор частоты повторения зондирующих сигналов в прецизионном космическом океанографическом радиовысотомере. – Исследование Земли из космоса, 2002, №1.