

МЕТОД АВТОКОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ РАДИОИМПУЛЬСА
В КОСМИЧЕСКИХ РСА Р-VHF-ДИАПАЗОНОВ

© 2004 г. О. В. Горячкин

Представлено академиком Ю.В. Гуляевым 18.03.2004 г.

Поступило 18.03.2004 г.

В последние годы обсуждаются проблемы реализации космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), предназначенных для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), работающих в диапазонах частот, пока не используемых в космической радиолокации. Это РСА, работающие в верхней части дециметрового диапазона и диапазона метровых волн (Р, UHF, VHF). Необходимость размещения таких РСА на борту космического аппарата диктуется сегодня разнообразными практическими нуждами, связанными с развитием радиолокационной картографии и геодезии, подповерхностного зондирования, различных коммерческих приложений ДЗЗ.

Однако размещению в космосе РСА, работающих в Р-диапазоне и особенно в VHF-диапазоне, препятствует ряд факторов [1–6]. Одним из основных являются существенные искажения зондирующего сигнала РСА на трассе распространения в атмосфере за счет изменяющегося с высотой регулярного распределения коэффициента преломления тропосферы и ионосферы, а также поляризационной дисперсии [1, 2].

Одним из наиболее предпочтительных путей преодоления последствий данных эффектов является компенсация искажений в процессе автофокусировки радиолокационных изображений [5]. Однако известные алгоритмы автофокусировки устойчиво работают только по тем фрагментам радиолокационных изображений, которые содержат “яркие” точечные цели. В данной работе предлагается метод автокомпенсации искажений радиолокационного изображения РСА, основанный на непосредственном извлечении искаженного вследствие влияния среды распространения или аппаратного тракта зондирующего сигнала РСА из радиоголограммы, и использования его далее при обработке по дальности. При этом качество работы алгоритма не зависит от сюжета изображения.

МОДЕЛЬ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА
КОСМИЧЕСКОЙ РСА

Отраженный сигнал космической РСА можно записать в виде

$$\dot{S}(t, kT) = \iint \dot{K}_A(kT, \theta, \sigma) \dot{K}_R(t - \Delta t(kT - \theta, \sigma)) \times \\ \times \dot{\xi}(\theta, \sigma) g_R(\sigma) g_A(kT - \theta, \sigma) d\theta d\sigma + \dot{v}(t, kT), \quad (1)$$

где

$$\dot{K}_R(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{h}(j\omega) \dot{K}_a(j\omega) \dot{K}_h(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega,$$

$$\dot{K}_A(kT, \theta, \sigma) = \exp(j\omega_0(\Delta t(kT - \theta, \sigma) + \delta(kT, \theta, \sigma))).$$

В этом выражении $\dot{\xi}(\theta, \sigma)$ – коэффициент отражения подстилающей поверхности, $\dot{h}(j\omega)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала, $\dot{K}_a(j\omega)$ описывает рефракцию зондирующего сигнала в регулярной атмосфере; $\dot{K}_h(j\omega)$ – передаточная характеристика аппаратного тракта, $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$ – регулярная часть временного запаздывания сигнала в атмосфере, $\delta(kT, \theta, \sigma)$ – флуктуационная компонента временного запаздывания сигнала в турбулентной атмосфере, t, kT – координаты (задержка, номер зондирующего сигнала), θ, σ – временные координаты элемента подстилающей поверхности (азимут, дальность), g_A и g_R – вещественные функции, описывающие модуляцию сигнала диаграммой направленности антенны РСА. Данная модель учитывает все основные эффекты, приводящие к искажениям РЛИ при распространении радиоволн в атмосфере Земли. В частности, искажения, возникающие вследствие распространения через атмосферу Земли широкополосных сигналов, описываются передаточной функцией $\dot{K}_a(j\omega)$. Вопросы, связанные с влиянием данного эффекта, и модели передаточной функции рассмотрены в [1, 2]. Влияние дисперсионных искажений в среде распространения на разрешение по дальности РСА, использующих широкополосные сигналы,

проявляется в том, что форма отраженного импульса отличается от ожидаемой. Поэтому при оптимальном приеме такого сигнала на выходе согласованного фильтра происходит увеличение длительности свертки, которая определяет разрешение по дальности. Поскольку $\tau = \Delta t(kT - \theta, \sigma)$ на интервале существования монотонная функция переменной σ , то, используя (1) и соответствующую замену переменных, получим модель сигнала РСА в виде

$$\dot{S}(t, k) = \int \dot{K}_R(t - \tau) \dot{\eta}(\tau, k) d\tau + \dot{V}(t, k), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{\eta}(\tau, k) = & \int \dot{K}_A(kT, \theta, \Delta t^{-1}(kT - \theta, \tau)) \times \\ & \times \dot{\xi}(\theta, \Delta t^{-1}(kT - \theta, k)) \times \\ & \times g_A(kT - \theta, \Delta t^{-1}(kT - \theta, \tau)) \times \\ & \times g_R(\Delta t^{-1}(kT - \theta, \tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} \Delta t^{-1}(kT - \theta, \tau) d\theta. \end{aligned}$$

Поскольку обычно $\dot{\xi}(\theta, \sigma)$ описывается моделью комплексного белого шума, то $\dot{\eta}(\tau, k)$ – комплексный нестационарный гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $B_{\eta}(\tau_1, \tau_2, k_1, k_2)$. Используя монотонность функции $\tau = \Delta t(kT - \theta, \sigma)$ и стационарность наблюдаемого сигнала в сечении азимута, свойственную обычной РСА, можно показать, что если $k = 0, 1, \dots, N - 1$ и $N \ll N_s$ (интервала синтеза апертуры в отсчетах), то $\dot{\eta}(\tau, k)$ можно считать независимыми реализациями нестационарного по дисперсии комплексного гауссовского случайного процесса.

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА РСА

Задачу компенсации искажений зондирующего сигнала РСА можно рассматривать в следующей последовательности. На первом этапе по радиолограмме РСА оценивается импульсная характеристика $\dot{K}_R(t)$ дальностного канала, на втором этапе решается задача восстановления $\dot{\eta}(\tau, k)$. В зависимости от характера искажений задачу второго этапа можно интерпретировать как некорректную задачу обращения интегрального оператора свертки (2) и решать ее, выбирая ту или иную стратегию регуляризации. Если имеются искажения зондирующего импульса, вызванные частотной зависимостью коэффициента преломления атмосферы, т.е. фазовые искажения, то более корректно интерпретировать задачу второго этапа как задачу разрешения отраженных импульсов

по задержке или задачу сжатия импульса. В этом случае алгоритмом оптимальной обработки является алгоритм согласованной фильтрации, где в качестве опорного сигнала используется оценка зондирующего импульса, полученная на первом этапе. Обозначая далее $\dot{h}(t) = \dot{K}_R(t)$, можно записать наблюдаемые реализации случайного процесса $\dot{S}(t, k)$ в виде стохастического интеграла

$$\dot{S}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{h}(t - \tau) g_R(\tau) d\dot{\zeta}(\tau) + \dot{V}(t),$$

где $\dot{\zeta}'(\tau) = d\dot{\zeta}(\tau)$ – стандартный комплексный “белый” шум с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, $\dot{\eta}(\tau) = g_R(\tau) \dot{\zeta}'(\tau)$ – нестационарный по дисперсии случайный процесс. Тогда корреляционная функция случайного процесса $\dot{S}(t)$ имеет вид

$$\begin{aligned} B_S(t_1, t_2) &= \mathbf{M}\{\dot{S}(t_1) \dot{S}^*(t_2)\} = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_1 - \tau) h^*(t_2 - \tau) g_R^2(\tau) d\tau + \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1). \end{aligned}$$

Вычислим двумерное преобразование Фурье $B_S(\omega_1, \omega_2)$ от корреляционной функции $B_S(t_1, t_2)$. Тогда

$$\begin{aligned} B_S(\omega_1, -\omega_2) &= \frac{N_0}{2} \delta(\omega_1 - \omega_2) = \\ &= \dot{H}(\omega_1) \dot{H}^*(\omega_2) B_x(\omega_1 - \omega_2), \end{aligned} \quad (3)$$

$$B_x(\omega_1 - \omega_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_R^2(\tau) e^{-j(\omega_1 - \omega_2)\tau} d\tau,$$

где $\dot{H}(\omega_1)$ – передаточная функция дальностного канала РСА, описываемого выражением (2). Запишем (3) в виде равенств отдельно для модуля и фазы $B_S(\omega_1, \omega_2)$:

$$\begin{aligned} \left| B_S(\omega_1, -\omega_2) - \frac{N_0}{2} \delta(\omega_1 - \omega_2) \right| &= \\ &= |\dot{H}(\omega_1)| |\dot{H}(\omega_2)| |B_x(\omega_1 - \omega_2)|, \\ \arg\left(B_S(\omega_1, -\omega_2) - \frac{N_0}{2} \delta(\omega_1 - \omega_2) \right) &= \\ &= \arg(\dot{H}(\omega_1)) - \arg(\dot{H}(\omega_2)) + \arg(B_x(\omega_1 - \omega_2)). \end{aligned}$$

Фиксируя разность $\omega_1 - \omega_2$, получим уравнения для модуля и фазы передаточной функции дальностного канала РСА, которые определяют ее с точностью до комплексного множителя и некоторого постоянного временного смещения. Для

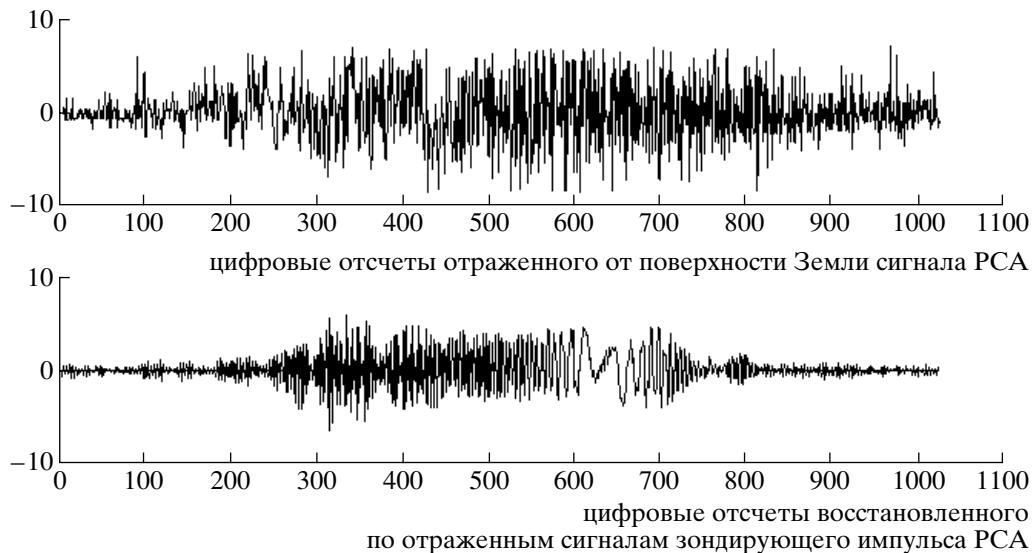


Рис. 1. Пример восстановления формы зондирующего импульса по отраженным сигналам РСА X-диапазона.

дискретных последовательностей конечной длины алгоритм оценки передаточной функции дальностного канала РСА можно записать в виде

$$\hat{H}(m) = \sqrt{\left| \hat{B}_s\left(\frac{m}{T}, \frac{-m}{T}\right) - \frac{N_0}{2} \right|} \times \exp\left(j \left(\sum_{i=0}^m \arg\left(\hat{B}_s\left(\frac{i}{T}, \frac{i+1}{T}\right)\right) \right)\right), \quad (4)$$

где $\hat{H}(m) = \hat{H}\left(\frac{m}{T}\right)$, $m = 0, 1, \dots, M-1$, T – период

повторения зондирующих импульсов, $\hat{B}_s(\omega_1, \omega_2)$ – выборочная оценка ковариационной функции, полученная по N отраженным импульсам. В целом алгоритм демонстрирует хорошую помехоустойчивость, однако требует весьма высокой степени нестационарности. Для космической РСА это означает, что при реализации алгоритма необходимо учесть дополнительное ограничение для полосы захвата. Данный недостаток может быть компенсирован увеличением числа обрабатываемых реализаций. Существенным преимуществом данного алгоритма (в отличие, например, от [5]) является отсутствие зависимости от сюжета радиолокационного изображения (в частности, наличия в зоне фокусировки ярких точек). Кроме того, для работы алгоритма не требуется априорного знания g_R . Для преодоления чувствительности алгоритма влиянию нелинейных искажений в тракте РСА, вызванных малоразрядным квантованием сигнала, можно использовать связь между ковариационной функцией сигнала, про-

шедшего идеальный ограничитель, с ковариационной функцией исходного сигнала:

$$B_s(t_1, t_2) = \Omega(t_1)\Omega(t_2) \left(\left(\sin\left(\frac{\pi}{2} r_{xx}(t_1, t_2)\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} r_{yy}(t_1, t_2)\right) \right) + j \left(\sin\left(\frac{\pi}{2} r_{xy}(t_1, t_2)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2} r_{yx}(t_1, t_2)\right) \right) \right).$$

В этом выражении r_{xx} , r_{yy} , r_{xy} , r_{yx} – корреляция знаковой последовательности исходной голограммы, $\Omega(t)$ – средняя по реализациям амплитуда отраженного сигнала во временной области, $B_s(t_1, t_2)$ – искомая ковариационная функция. Для снижения уровня боковых лепестков можно использовать новые временные окна, синтезированные в [7]. Экспериментальная проверка возможности использования данного алгоритма для коррекции искажений дальностного канала РСА проводилась с использованием информации авиационной РСА X-диапазона и дала положительные результаты. На рис. 1 показан пример восстановления зондирующего ЛЧМ-импульса РСА по результатам обработки 1000 отраженных сигналов.

Таким образом, предложенный метод оценки искаженного в ионосфере зондирующего сигнала РСА обеспечивает возможность гарантированной компенсации данного эффекта независимо от сюжета РЛИ. Реализация метода обеспечивает возможность реализации радиолокационных космических систем ДЗЗ высокого разрешения в P-VHF-диапазонах частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. // РЭ. 1992. № 1. С. 90–95.
2. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. // РЭ. 1991. Т. 36. № 1. С. 1–6.
3. Горячкин О.В. // Компьютер. оптика. 2002. В. 24. С. 177–183.
4. Ефимов А.И., Калинин А.А., Кутуза Б.Г. // Радиотехника. 1998. № 2. С. 19–24.
5. Штейншлейгер В.Б., Дзенкевич А.В., Мананков В.Ю. и др. // РЭ. 1997. Т. 42. № 6. С. 725–732.
6. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J. et al. // Radio Sci. 1999. V. 34. № 1. P. 257–268.
7. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. М.: Радиотехника, 2003.