

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Научная сессия Отделения общей физики и астрономии  
Российской академии наук**

(22 апреля 1998 г.)

22 апреля 1998 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. Штейншлейгер В.Б., Дзенкевич А.В., Манаков В.Ю., Мисежников Г.С. (Московский научно-исследовательский институт приборостроения, Москва). *О преодолении деструктивного влияния ионосферы на разрешающую способность трансionoсферной РЛС УКВ-диапазона волн при дистанционном зондировании Земли.*

2. Брагинский В.Б. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва). *Декогерентизация и квантовые измерения в лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории.*

3. Лозовик Ю.Е. (Институт спектроскопии, г. Троицк, Московская обл.) *Фазовая диаграмма и сверхтекучесть экситонов и магнитоэкситонов в двойных квантовых полях.*

Краткое содержание первого из них публикуется ниже.

PACS number: 93.85.+q

**О преодолении деструктивного влияния  
ионосферы на разрешающую  
способность трансionoсферной РЛС  
УКВ-диапазона волн  
при дистанционном зондировании Земли**

В.Б. Штейншлейгер, А.В. Дзенкевич,  
В.Ю. Манаков, Г.С. Мисежников

Современные космические радиолокационные станции с синтезированной апертурой (РСА) работают в микроволновом (сантиметровом или дециметровом) диапазоне волн. Вследствие этого они оказываются неэффективными, когда требуется наблюдать естественные образования и другие объекты, находящиеся под растительным покровом и/или под поверхностным слоем Земли. Такая информация необходима для решения разнообразных народнохозяйственных и экологических задач.

Затухание радиоволн в растительном покрове и, особенно, в подповерхностном слое Земли, а также обратное рассеяние волн от растительного покрова значительно меньше в УКВ-диапазоне, чем в микроволновом. Однако для реализации в РСА этих преимуществ УКВ-диапазона требуется достаточно высокая разрешающая способность (порядка нескольких длин волн), чтобы в необходимой степени уменьшить обратное рассеяние от элемента разрешения на местности.

В связи с этим можно показать [1], что существует оптимальная длина волн  $\lambda_{\text{опт}}$ , при которой способность РСА выделять на фоне отражений от местности объекты, находящиеся под растительным покровом и/или под поверхностным слоем Земли, максимальна. Для практически важных ситуаций величина  $\lambda_{\text{опт}}$  находится в диапазоне метровых волн. Так, например, на волне  $\lambda = 2,5$  м при разрешении  $\sim 3\lambda$  объект с эффективной площадью рассеяния (ЭПР), равной  $8 \text{ м}^2$ , может быть надежно обнаружен под поверхностью Земли на глубине 16 м в сухом песке и во влажном песке (влажность 8 %) на глубине 1,5 м; при указанных условиях на длине волны  $\lambda = 0,6$  м и разрешении  $3\lambda$  может быть обнаружен объект, если его ЭПР превышает  $60 \text{ м}^2$ .

В самолетных РСА метрового диапазона волн может быть обеспечена требуемая высокая разрешающая способность. Однако в космической РСА этого диапазона возможность получения высокой разрешающей способности сильно ограничивается из-за деструктивного влияния ионосферы. Так, вследствие дисперсионных фазовых искажений радиоимпульса в ионосфере разрешающая способность по дальности космической РСА в диапазоне длин волн 2–3 м может ухудшаться приблизительно до 100 м [2].

Из-за флуктуаций фазы сигнала на интервале синтеза апертуры, что обусловлено неоднородностью электронной концентрации в ионосфере в луче РСА, азимутальная разрешающая способность космической РСА в диапазоне волн 2–3 м может ухудшаться до нескольких сотен метров [3]. Для многих практически важных областей применения дистанционного зондирования Земли столь низкая разрешающая способность по обеим координатам неприемлема.

В работах [1, 4] показана принципиальная возможность преодоления указанных ограничений разрешающей способности космических РСА УКВ-диапазона волн путем адаптивной обработки на выходе РСА принятых

© В.Б. Штейншлейгер, А.В. Дзенкевич,  
В.Ю. Манаков, Г.С. Мисежников 1998

сигналов. В докладе приводятся результаты полунатурного моделирования такой обработки с использованием реальной информации самолетной РСА УКВ-диапазона, записей реальных фазовых флуктуаций сигналов этого диапазона в ионосфере и экспериментальных данных об ионосферной дисперсии.

При прохождении через ионосферу радиоимпульс подвергается поляризационным искажениям и искажающему влиянию фазовой дисперсии, что ухудшает разрешающую способность РСА по дальности. Если излучаемый радиоимпульс имеет круговую поляризацию, то поляризационные искажения пренебрежимо малы [2], поэтому далее, предполагая, что приемник РСА принимает радиоимпульсы с круговой поляризацией, будем учитывать только фазовую дисперсию.

Полагаем, что излучаемый сигнал является радиоимпульсом с гауссовой огибающей, с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с девиацией  $B$  за время импульса  $T$ , средней частотой  $f_0$ , базой  $BT \gg 1$  и крутизной ЛЧМ сигнала  $\mu = 2\pi B/T$  (крутизна ЛЧМ может быть как положительной, так и отрицательной величиной).

В высокочастотном приближении фазовый сдвиг  $\varphi$  сигнала в собственно ионосфере представим в виде разложения в ряд Тейлора по степеням величины  $\Omega = 2\pi(f - f_0)$  ( $f$  — частота в спектре):

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi'_0 \Omega + \varphi''_0 \frac{\Omega^2}{2!} + \varphi'''_0 \frac{\Omega^3}{3!} + \dots \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \varphi'_0 &= 1,34 \times 10^{-7} f_0^{-2} N_\Sigma; \quad \varphi''_0 = -4,28 \times 10^{-8} f_0^{-3} N_\Sigma; \\ \varphi'''_0 &= 2,04 \times 10^{-8} f_0^{-4} N_\Sigma. \end{aligned} \quad (2)$$

Величина  $N_\Sigma$  равна общему содержанию электронов в трубке с поперечным сечением  $1 \text{ м}^2$  на всей длине трассы при двукратном прохождении; максимальное значение  $N_\Sigma \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$ .

Дисперсионные фазовые искажения, определяемые членами ряда (1) начиная с квадратичного, можно скомпенсировать при приеме радиоимпульса, если фазовую характеристику дисперсионного фильтра в приемнике, сжимающего ЛЧМ-сигнал, или опорную функцию при цифровой сжатии согласовать не с излучаемым сигналом, а с принимаемым сигналом, прошедшим сквозь ионосферу.

В первом приближении, учитывающем только квадратичные фазовые искажения в (1), групповое время  $\tau$  задержки в таком согласованном фильтре запишется в виде

$$\tau \approx t_F - \left[ \frac{1}{\mu} - |\varphi''_0| \right] \Omega = t_F - D_F \Omega, \quad (3)$$

где  $t_F$  — не зависящая от частоты задержка,  $D_F = 1/\mu^*$  — коэффициент дисперсии фильтра,  $\mu^*$  — крутизна принимаемого ЛЧМ-сигнала.

Так, например, в УКВ-диапазоне при несущей частоте  $f = 120 \text{ МГц}$  ( $\lambda = 2,5 \text{ м}$ ) первое приближение справедливо до величины девиации  $B_1 \cong 15 \text{ МГц}$ ; второе приближение, учитывающее также кубичные искажения, справедливо до девиации  $B_2 \cong 30 \text{ МГц}$ . Разрешающая способность  $\Delta r_1 \approx 15 \text{ м}$  и  $\Delta r_2 \approx 7,5 \text{ м}$  соответственно.

Ввиду невозможности обеспечить априорное знание величины  $N_\Sigma$  с требуемой высокой точностью необходимо применять адаптивную установку параметров дисперсионной характеристики фильтра (коэффициентов опорной функции при цифровой обработке), используя при этом соответствующий критерий оценки качества сжатых сигналов на выходе системы обработки. Указанная компенсация дисперсионных фазовых искажений радиоимпульса РСА должна проводиться совместно с компенсацией флуктуационных искажений фазы на апертуре, т.е. компенсация должна быть двумерной: по дальности и азимуту.

Компенсация азимутальных ионосферных флуктуационных фазовых искажений (т.е. одномерная компенсация) с применением алгоритма фазово-градиентной автофокусировки (ФГА) [5] рассмотрена авторами в работах [1, 4].

Ниже рассматривается одновременная компенсация как дисперсионных, так и флуктуационных искажений, т.е. двумерная компенсация ионосферных искажений.

Для определенности ограничимся только квадратичным членом дисперсионных искажений в (1). Пусть на основании априорных данных о величине  $N_\Sigma$  имеется  $n$  дисперсионных фильтров ( $n$  опорных функций при цифровой обработке) с различными значениями коэффициента дисперсии  $D_F$  (3) для сжатия радиоимпульса по дальности.

Для каждого из  $n$  значений  $D_F$  сначала проводится сжатие ЛЧМ-сигналов РСА по дальности и по азимуту, затем — операции по выбору оптимального значения  $D_F = D_{\text{опт}}$ . Один из способов определения  $D_{\text{опт}}$  заключается в следующем: проводятся начальные операции, которые осуществляют при компенсации азимутальных флуктуационных фазовых искажений (см. [1]) по алгоритму ФГА. В результате из имеющихся  $n$  значений  $D_F$  выбирается значение  $D_F = D_0$ , для которого суммарная интенсивность наиболее сильных сигналов по всем каналам дальности [1] имеет наибольшее значение. Если интервалы между значениями  $D_F$  соответствуют большим скачкам фазы, то после указанной процедуры величину  $D_F$  несколько варьируют вокруг значения  $D_0$  и окончательно выбирают то значение  $D_F$ , при котором указанная суммарная интенсивность достигает абсолютного максимума. Эта реализация соответствует оптимальному значению  $D_F = D_{\text{опт}}$ .

Для выбранного оптимального значения  $D_F = D_{\text{опт}}$  затем проводится компенсация азимутальных флуктуационных фазовых ионосферных искажений, как это описано в [1].

Другой метод компенсации дисперсионных фазовых искажений, исследованный в данной работе, заключается в том, что после определения величины  $D_0$  (см. выше) вместо вариации  $D_F$  для дальнейшего уменьшения дисперсионных искажений применен алгоритм ФГА по дальности по аналогии с описанным в [1] алгоритмом азимутальной ФГА.

При компенсации азимутальных фазовых флуктуаций с помощью алгоритма ФГА важно знать размер области пространственной инвариантности фазовой ошибки, т.е. размер области на местности, все точки которой имеют одинаковую фазовую ошибку (с точностью до допустимой малой величины  $\delta\varphi$ ). В [1] авторами дана формула для расчета размера указанной области.

В описываемом ниже полунатурном эксперименте использованы радиолокационные изображения и цифровые данные реальных комплексных сигналов самолетной РСА "Имарк", работавшей на длине волны  $\lambda \cong 2,5$  м [1]. Разрешающая способность этой РСА по дальности равна  $\sim 15$  м, а по азимуту  $\sim 8-10$  м, длительность излучаемого импульса  $T = 6,4$  мкс, девиация ЛЧМ  $B = 10$  МГц.

При одинаковой разрешающей способности этой РСА и гипотетической космической РСА того же диапазона волн с высотой орбиты 600 км время синтеза обоих РСА оказывается приблизительно одинаковым.

В указанные цифровые данные самолетной РСА вводились в частотной области дисперсионные искажения фазы радиоимпульса, соответствующие квадратичному члену в (1) с максимальным фазовым сдвигом на краю спектра  $\Delta\varphi \approx 50$  рад (что соответствует при указанной ширине спектра расширению короткого импульса примерно на 6 мкс).

Флуктуационные азимутальные ионосферные фазовые искажения вводились, как и в [1], на основе реальных записей когерентного сигнала на частоте 137 МГц от ИСЗ с орбитой  $H = 1000$  км, пересчитанных для орбиты РСА  $H = 600$  км; среднеквадратичное значение "быстрых" фазовых флуктуаций составляет  $\sim 3,2$  рад.

Экспериментальное исследование описанной выше двумерной компенсации включало следующие этапы.

Осуществлялось сжатие сигналов по азимуту и по дальности в частотной области для девяти значений коэффициента дисперсии  $D_F$ , перекрывающих равномерно значения возможных дисперсионных искажений в ионосфере.

Затем проводилась операция синтеза апертуры во всех дальностных каналах для каждого из девяти указанных вариантов сжатия по дальности. Для синтеза использовался гармонический алгоритм [1].

Далее проводятся операции по определению оптимального значения крутизны  $D_{\text{opt}}$  опорной функции, как это описано выше.

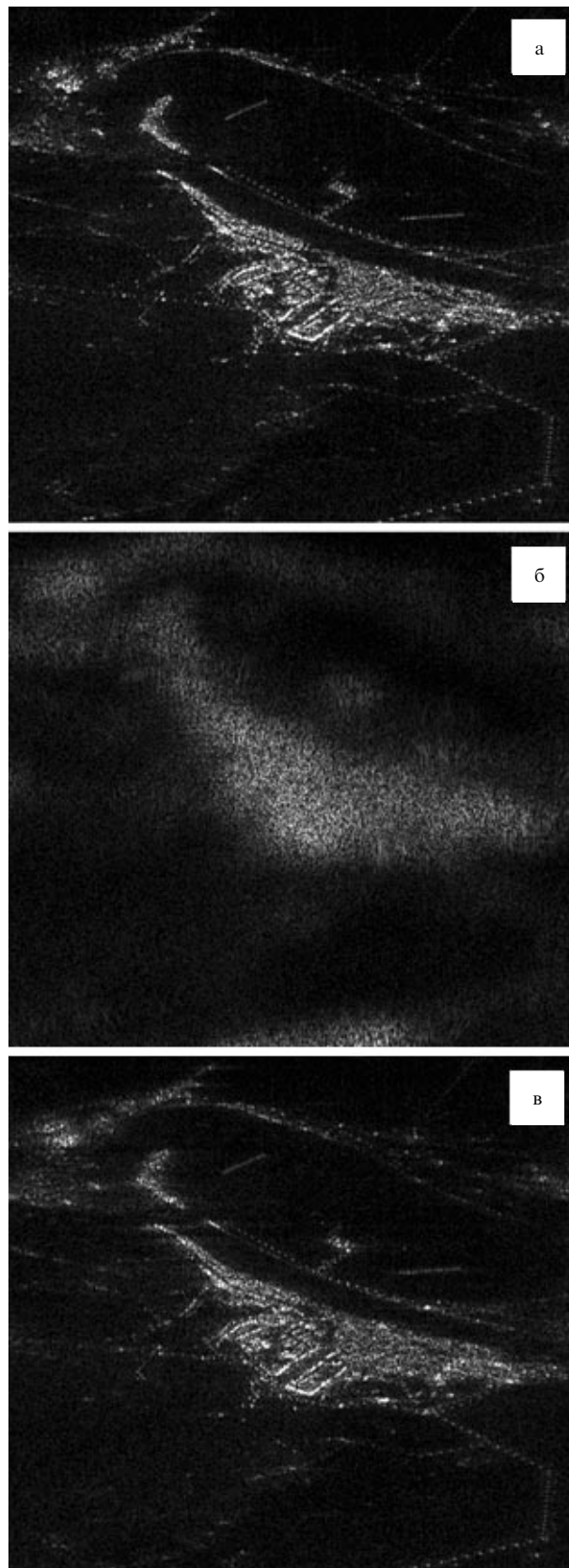
Из девяти вариантов сжатия выбираются два со значениями  $D_F$ , равными  $D_1$  и  $D_2$ , наиболее близкими к оптимальному значению в соответствии с критерием, указанным выше.

Интервал между выбранными значениями  $D_1$  и  $D_2$  делится на три части и из четырех значений  $D_F$  от  $D_1$  до  $D_2$  выбирается одно, для которого удовлетворяется указанный критерий максимума суммарной интенсивности. Это и есть оптимальное значение  $D_{\text{opt}}$ .

Для выбранного варианта сжатия по дальности при  $D_F = D_{\text{opt}}$  проводится автофокусировка по азимуту по алгоритму ФГА, как описано в [1].

На рисунке представлены радиолокационные изображения (РЛИ) участка городской местности, полученные при обработке. Рисунок (а) соответствует исходному РЛИ, полученному с помощью РСА "Имарк" на волне  $\sim 2,5$  м; рис. (б) — РЛИ после введения дисперсионных и флуктуационных фазовых ионосферных искажений; рис. (в) — РЛИ после двумерной адаптивной компенсации введенных искажений. Изображения на (а) и (в) мало различаются между собой.

Были получены также РЛИ при использовании второго описанного выше способа компенсации дисперсионных искажений с применением ФГА и по дальности.



Радиолокационные изображения (РЛИ) участка городской местности до введения ионосферных искажений (а), после введения дисперсионных и флуктуационных фазовых ионосферных искажений (б), после двумерной адаптивной компенсации указанных искажений (в).

Различий в РЛИ, полученных обоими описанными методами, не замечено. Следует, однако, указать, что при непосредственном применении алгоритма ФГА по дальности без предварительного перебора коэффициентов дисперсии  $D_F$  для определения величины  $D_0$  получаемые РЛИ уступали по качеству изображениям, полученным после указанного перебора.

### Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности предложенной двумерной адаптивной компенсации дисперсионных и флуктуационных ионосферных искажений сигналов космической РСА УКВ-диапазона волн. Это создает предпосылку для дистанционного зондирования Земли с помощью транссионсферной

РСА УКВ-диапазона волн, обладающей повышенной способностью проникновения сквозь растительный покров и верхний слой земной поверхности. Создание такой РСА позволит решать ряд важных народнохозяйственных и экологических задач.

### Список литературы

1. Штейншлейгер В Б и др. *РЭ* **42** 725 (1997)
2. Enert P, in *Colloque Intern. Radar Intern. Conf. "Radar 94"* (Paris, 1994) p. 512
3. Кретов Н В и др. *РЭ* **37** (1) 90 (1992)
4. Shteinshleiger V et al., in *Europ. SAR Conf. "EUSAR-96" Record* (Kenigswinter, 1996) p. 321
5. Wahl D et al. *IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.* **30** (3) 827 (1994)