

УДК 621.396.96

Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев  
 АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург)  
 В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Эхосигнал спутникового высотомера с учетом доплеровского рассеяния

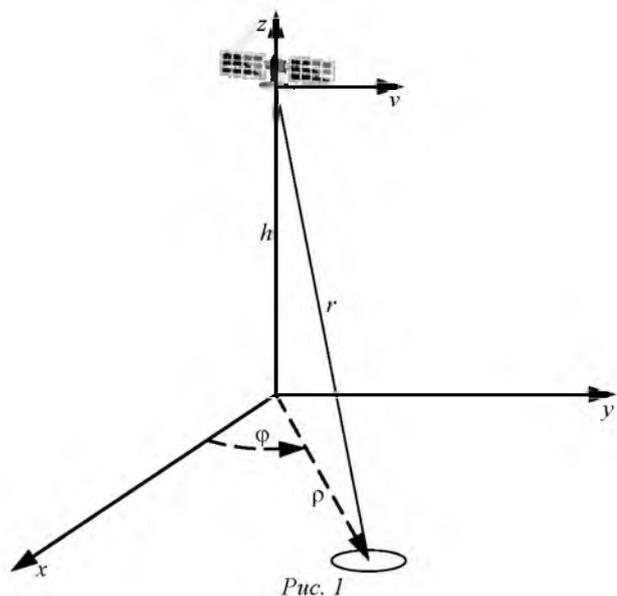
*Получено выражение для профиля мощности отраженного сигнала спутникового высотомера с учетом доплеровского рассеяния при зондировании сигналами с линейной частотной и фазовой модуляцией. Установлено отсутствие влияния доплеровского сдвига эхосигнала на нарастающий фронт профиля. Показано, что задний фронт профиля при зондировании импульсом с линейной частотной модуляцией также нечувствителен к доплеровскому смещению, тогда как при зондировании фазомодулированным импульсом длительность профиля при учете доплеровского рассеяния существенно сокращается.*

**Спутниковый высотомер, эхосигнал, доплеровское рассеяние, ЛЧМ-сигнал, ФМ-сигнал, синтезированная антенна**

Радиолокационные высотомеры спутникового базирования составляют основу космических миссий дистанционного мониторинга поверхности Земли, позволяя в любое время года и суток и при любом состоянии атмосферы измерять возвышения морской поверхности над референц-эллипсоидом, взволнованности моря, силы и направления приповерхностного ветра и т. д. При извлечении информации об измеряемых параметрах спутниковые альтиметры опираются на усредненную по серии зондирований зависимость мощности эхосигнала на входе приемника от времени – профиль мощности. При расчете последнего эффект Доплера, как правило, во внимание не принимается [1]–[5]. Подобный подход безоговорочно оправдан для импульсов, длительность которых пренебрежимо мала в сравнении с максимальным периодом доплеровской частоты. Между тем, зондирующий импульс в современных спутниковых альтиметрах имеет длительность  $T$  порядка сотни микросекунд и укорачивается до нескольких наносекунд лишь в результате компрессии приемным согласованным фильтром (СФ) [2]–[4]. В частотном диапазоне Ка (35.75 ГГц), используемом, к примеру, современным космическим альтиметром AltiKa [2], [4], период доплеровской частоты эхосигнала от блестящей точки в пределах освещаемого пятна вполне может оказаться соизмеримым с длительностью зондирующего сигнала  $T$  или меньшим. В настоящей статье

аналитическое выражение для профиля мощности принятого сигнала уточняется с учетом указанного фактора.

**Профиль мощности отраженного сигнала с учетом эффекта Доплера.** Обратимся к рис. 1 [2], [4], [5], на котором координатная ось  $y$  параллельна вектору путевой скорости  $v$  космического аппарата (КА);  $h$  – высота орбиты КА;  $r$  – наклонная дальность от фазового центра антенны до точечного отражателя;  $\rho$ ,  $\varphi$  – полярные координаты последнего. Антенна альтиметра предполагается ориентированной строго в направлении надира. Из рис. 1 следует:



$$r^2(t) = (\rho \sin \varphi - vt)^2 + \rho^2 \cos^2 \varphi + h^2,$$

так что радиальная скорость КА относительно отражателя

$$v_r = \left. \frac{dr(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{v\rho \sin \varphi}{r},$$

где  $r = r(0) = \sqrt{h^2 + \rho^2}$ . Тем самым доплеровское приращение частоты

$$F = \frac{2v_r}{\lambda} = -\frac{2v\rho \sin \varphi}{r\lambda} \approx -\frac{2v\rho \sin \varphi}{h\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина излучаемой волны, а последнее приближение справедливо, поскольку при малой ширине луча  $\theta_0$  антенны  $\rho \ll h$ . Для несущей частоты  $f_0 = 35.75$  ГГц  $\lambda \approx 0.84$  см и при диаметре параболического зеркала  $D = 1$  м ширина луча на половинном уровне  $\theta_0 \approx 70\lambda/D \approx 0.6^\circ$  [6]. Путевая скорость КА (первая космическая скорость)

$$v = \sqrt{g_h(R_e + h)},$$

где  $R_e = 6370$  км – радиус Земли;  $g_h$  – ускорение свободного падения на высоте  $h$  над поверхностью Земли. При высоте орбиты  $h = 1000$  км  $g_h \approx 7.35$  м/с<sup>2</sup> и  $v \approx 7.36$  км/с. Для отражателя вблизи края освещаемого пятна  $\rho = h \operatorname{tg}(\theta_0/2) \approx 5.2$  км и, если он находится на оси  $y$ , т. е.  $\sin \varphi = 1$ , согласно (1)  $F \approx 9.11$  кГц. Подобная доплеровская расстройка, сопоставимая с интервалом разрешения по частоте  $1/T \approx 10$  кГц (при  $T = 100$  мкс), приведет к резкому снижению отклика СФ на сигнал от элементарного отражателя, т. е. к уменьшению его вклада в суммарный профиль мощности. Этот эффект будет особенно выражен для удаленных точек впереди по курсу КА, что равносильно сокращению освещаемого пятна, а значит, ускоренному (по сравнению со случаем неучета доплеровского сдвига) спаданию заднего фронта профиля.

Внесем коррективы в методику определения профиля принимаемой мощности, отражающие влияние доплеровского рассеяния. Для этого обратимся к выражению для профиля мощности отраженного сигнала высотомера [2]–[5]

$$P_r(t) = A \int_0^\infty \int_0^\pi \frac{s^2(t + 2(h-r)/c)}{[1 + (\rho/h)^2]^2} G^2(\theta) \rho d\rho d\varphi, \quad (2)$$

где  $G(\theta)$  – диаграмма направленности антенны (ДНА).

При наличии доплеровского сдвига отклик СФ описывается функцией неопределенности (ФН) зондирующего сигнала:

$$\psi(\tau, F) = \left| \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^\infty \dot{S}(t) \dot{S}^*(t - \tau) \exp(-j2\pi Ft) dt \right|, \quad (3)$$

где  $E$  и  $\dot{S}(t)$  – энергия и комплексная огибающая зондирующего сигнала соответственно.

Заменим в двойном интеграле (2) квадрат сигнала на выходе СФ  $s^2(t)$  квадратом функции (3). В результате с учетом (1)

$$P_r(t) = A \int_0^\infty \int_0^\pi \frac{\psi^2\left(t + 2\frac{h-r}{c}, -\frac{2v\rho \sin \varphi}{h\lambda}\right)}{[1 + (\rho/h)^2]^2} \times G^2(\theta) \rho d\rho d\varphi, \quad (4)$$

где  $A$  – множитель, объединяющий величины, не зависящие от координат отражателей.

Аппроксимируем главный пик ФН (3) гауссовской поверхностью с эллипсом горизонтального сечения, симметричным относительно осей  $\tau, F$ :

$$\psi(\tau, F) = \exp(-\beta_\tau \tau^2 - \beta_F F^2), \quad (5)$$

где  $\beta_\tau, \beta_F$  – параметры, характеризующие скорость спада ФН вдоль осей запаздывания и частоты соответственно. Описанный тип симметрии горизонтального сечения (диаграммы неопределенности) характерен для сигналов без частотной модуляции [7], [8]. Если  $\Delta_{0.5}, F_{0.5}$  – ширина автокорреляции по уровню половинной мощности и протяженность ФН вдоль частотной оси по тому же уровню соответственно, имеем

$$\beta_\tau = 2 \ln 2 / \Delta_{0.5}^2, \quad \beta_F = 2 \ln 2 / F_{0.5}^2.$$

Подставив (5) в (4) и воспользовавшись традиционным приближением для ДНА

$$G(\theta) = \exp[-(2/\gamma) \sin^2 \theta] = \exp[-2\rho^2 / (\gamma r^2)] = \exp\left[-\frac{2\varepsilon^2}{\gamma(1 + \varepsilon^2)}\right],$$

где  $\varepsilon = \rho/h$ , получим:

$$P_r(t) = \frac{Ah^2}{2} \int_0^\infty \int_0^\pi \frac{N_1}{(1 + \varepsilon^2)^2} d\varphi d\varepsilon^2, \quad (6)$$

где

$$N_1 = \exp \left\{ -2\beta_\tau \left[ t + 2\frac{h}{c}(1 - \sqrt{1 + \varepsilon^2}) \right]^2 - 2\beta_F \left( \frac{2v\varepsilon \sin \varphi}{\lambda} \right)^2 - \frac{4\varepsilon^2}{\gamma(1 + \varepsilon^2)} \right\}.$$

Обозначив  $\delta_F = 4\beta_F v^2 / \lambda^2$  и выполнив в (6) интегрирование по  $\varphi$  с учетом того, что

$$\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(z \cos \theta) d\theta = I_0(z)$$

– модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, приходим к выражению

$$P_r(t) = A_1 \int_0^\infty \frac{N_2}{(1 + \varepsilon^2)^2} I_0(\delta_F \varepsilon^2) d\varepsilon^2, \quad (7)$$

где  $A_1 = A\pi h^2 / 2$ ;

$$N_2 = \exp \left\{ -2\beta_\tau \left[ t + 2(h/c)(1 - \sqrt{1 + \varepsilon^2}) \right]^2 - \delta_F \varepsilon^2 - \frac{4\varepsilon^2}{\gamma(1 + \varepsilon^2)} \right\}.$$

Так как  $\varepsilon^2 \ll 1$ , можно в ряде Тейлора для показателя экспоненты под интегралом ограничиться лишь линейными членами относительно  $\varepsilon^2$ . На том же основании допустимо отбросить  $\varepsilon^2$  в знаменателе подынтегральной дроби (7). В итоге

$$P_r(t) \approx A_1 \int_0^\infty \exp \left[ -2\beta_\tau \left( t - \frac{hx}{c} \right)^2 - \left( \delta_F + \frac{4}{\gamma} \right) x \right] I_0(\delta_F x) dx.$$

Последнее выражение представляет, в частности, профиль принятой мощности при использовании зондирующего сигнала с бинарной фазовой манипуляцией (ФМ). Графики нормированных полного профиля и его переднего фронта,

рассчитанные для этого случая, приведены на рис. 2, а, б соответственно, где сплошной линией показаны кривые, построенные без учета доплеровского рассеяния, а штриховой – для путевой скорости КА  $v \approx 7.36$  км/с. За исходные принимались следующие параметры: несущая частота  $f_0 = 35.75$  ГГц, ширина полосы  $W = 320$  МГц, ширина луча антенны  $\theta_0 = 0.6^\circ$ , высота орбиты КА  $h = 1000$  км, длительность излучаемого импульса  $T = 100$  мкс.

При этом треугольная автокорреляционная функция, как и сечение ФН плоскостью  $\tau = 0$ , имеющее форму  $|\sin(\pi FT) / (\pi FT)|$ , заменялись гауссовскими кривыми с теми же протяженностью по половинному уровню вдоль осей  $\tau$  и  $F$  соответственно. Как следует из рис. 2, при зондировании ФМ-импульсом учет доплеровского рассеяния критически важен для прогнозирования заднего фронта профиля мощности. В то же время передний фронт профиля, играющий ключевую роль в измерении высоты и взволнованности моря, к эффекту Доплера практически нечувствителен. С другой стороны, из аналогичных графиков рис. 3, построенных для случая зондирования импульсом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), видно, что в этом случае эффект Доплера не оказывает существенного влияния ни на передний, ни на задний фронты профиля мощности.

Отмеченные различия вполне предсказуемы. Действительно, поскольку ЛЧМ-сигнал имеет ФН в виде узкого протяженного гребня, повернутого относительно осей времени и частоты, отклик приемного СФ на отраженный сигнал с доплеровским сдвигом отличается от отклика на сигнал, не смещенный по частоте, лишь некоторой задержкой. Поэтому суперпозиции множеств откликов, учитывающие и игнорирующие доплеровское рассеяние, очевидно, похожи друг на

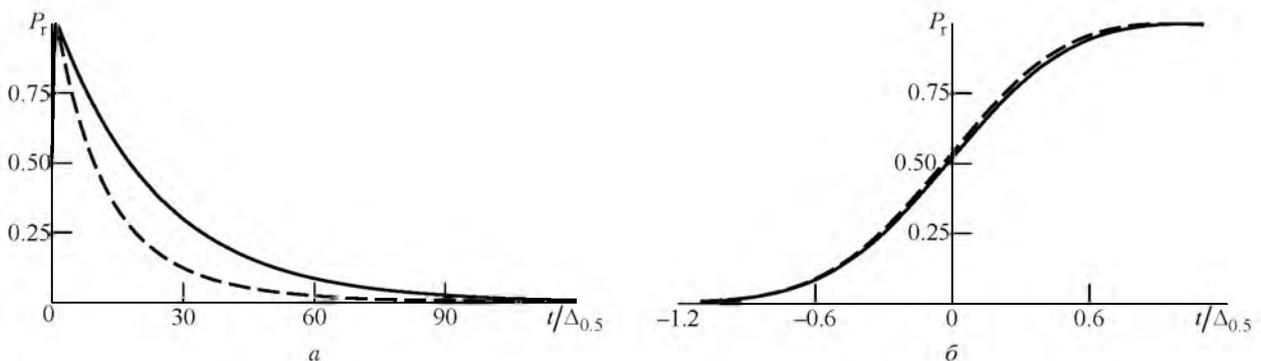


Рис. 2

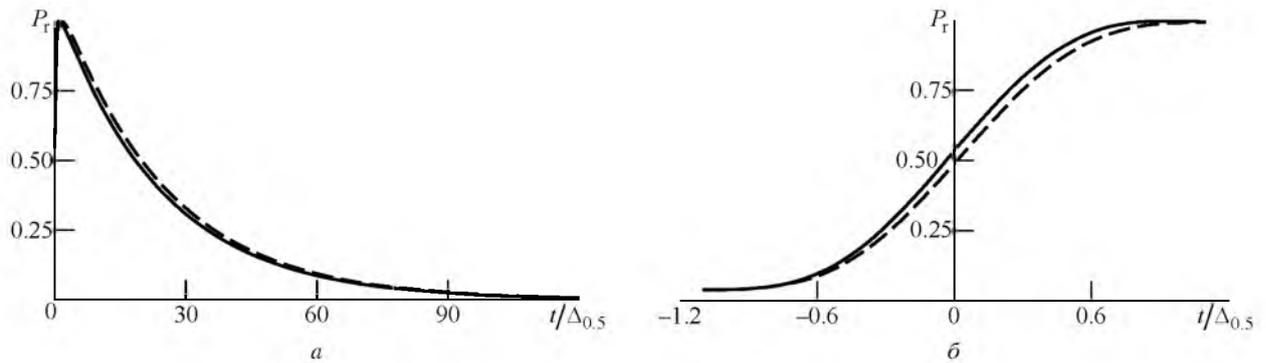


Рис. 3

друга. В противовес этому иглообразный характер ФН действительного ФМ-сигнала приведет к ослаблению откликов СФ на отражения с заметным доплеровским сдвигом, которые приходят с направлений, ощутимо отклоняющихся от главной оси антенны. Тем самым получается, что для ФМ-сигнала отражения от периферийных освещаемых участков, формирующие спадающий фронт, ослабляются не только за счет направленности антенны, но и из-за снижения мощности отклика СФ на сигналы с доплеровским сдвигом. Это и обуславливает ускоренное убывание профиля мощности для ФМ-сигнала в сравнении с сигналом ЛЧМ.

В заключение отметим, что в приведенных оценках составляющая доплеровского рассеяния, обусловленная вращением Земли, не учитывалась на том основании, что путевая скорость земной поверхности (около 463 м/с) мала по сравнению со скоростью КА.

**Эффект Доплера и разрешающая способность альтиметра.** Как видно из (1) и рис. 1, для всех точек облучаемой поверхности, лежащих на нормали к следу траектории КА, доплеровский сдвиг одинаков и линейно меняется в пределах  $\pm 2|v|y/(\lambda h)$  с координатой  $y$  точечного отражателя. Поскольку названная координата сама линейно убывает со временем от некоторого максимума  $y_{\max}$  до  $-y_{\max}$ , сигнал, отраженный блестящей точкой за все время ее пребывания в луче антенны, приобретает частотную модуляцию с девиацией  $W_p = 4|v|y_{\max}/(\lambda h)$ . Примем за  $y_{\max}$  радиус засветки по уровню половинной мощности, рассчитанный в предыдущем разделе для антенны с углом раскрытия  $\theta_0 = 0.6^\circ$  и высоты орбиты  $h = 1000$  км:  $y_{\max} \approx 5.2$  км. Поскольку для принятой высоты  $v \approx 7.36$  км/с, при  $f_0 = 35.75$  ГГц получим  $W_p \approx 18$  кГц. С другой стороны, полная длительность сигнала от блестящей точки за вре-

мя облучения  $T_p \approx 2y_{\max}/|v| \approx 1.4$  с, так что его частотно-временное произведение  $W_p T_p$  имеет порядок 25 000. При подобном значении  $W_p T_p$  спектр ЛЧМ-сигнала близок к прямоугольному с полосой  $W_p$ , так что после обработки СФ сигнал от элементарного отражателя сожмется до длительности около  $\Delta_p \approx 1/W_p \approx 60$  мкс. Согласно стандартной (рэлеевской) трактовке разрешающей способности, для разрешения соседних отражателей их отклики на выходе СФ должны отстоять по времени на  $\Delta_p$ . Такой временной сдвиг между откликами получится, если отражатели смещены по координате  $y$  на  $\delta y = \Delta_p v \approx 0.44$  м. Как видно, обработка отраженного сигнала с учетом его доплеровской динамики потенциально улучшила бы разрешающую способность альтиметра вдоль траектории КА на много порядков, доведя ее до долей метра.

Представленные результаты получены при классическом синтезировании раскрыва антенны [9], [10]. По-видимому, изначально этот факт не был осознан специалистами по спутниковой альтиметрии, что привело к появлению избыточного термина "delay-Doppler technique" [11], иногда встречающегося и в более поздних источниках. Полученная в настоящем разделе оценка разрешения вдоль оси  $y$  полностью согласуется с тем фактом, что разрешающая способность синтезированной антенны в продольном направлении близка к половине раскрыва физической антенны [10] (в рассмотренном случае к 0.5 м).

Практическое воплощение технологии синтезирования раскрыва в описанной предельной форме достаточно затратно в плане вовлекаемого ресурса, так как требует хранения амплитуд и фаз отраженных сигналов в течение протяженного отрезка времени (1.5 с). Другим ограничением может явиться

малый интервал когерентности отраженного сигнала, за пределами которого когерентная обработка утратит смысл и не приведет к ожидаемой временной компрессии отклика обрабатывающего фильтра. К примеру, в пределах интервала когерентности порядка 5 мс девиация частоты отраженного сигнала сократится в 300 раз, что приведет к пропорциональному ухудшению разрешения до  $\delta y \approx 132$  м.

Выполненный анализ показал, что при высоте орбиты КА порядка 1000 км доплеровский сдвиг эхосигналов Ка-диапазона, отраженных блестящими точками на периферии освещаемого пятна, сопоставим с интервалом разрешения по частоте. Для ЛЧМ-сигнала из-за сильной частотно-временной корреляции этот факт не приводит к заметному изменению формы профиля относительно рассчитан-

ной без учета эффекта Доплера. Для сигнала же с фазовой манипуляцией приемный СФ заметно ослабит сигналы от периферийных отражателей, что приведет к ускоренному спаданию заднего фронта профиля относительно расчета, игнорирующего доплеровское рассеяние. Влияние последнего на передний фронт профиля практически неощутимо независимо от формата модуляции сигнала. Использование зависимости доплеровского сдвига отражения от расстояния между КА и блестящей точкой для синтезирования раскрыва антенны потенциально многократно улучшает разрешающую способность альтиметра в продольном направлении. Применимость подобной технологии, однако, может существенно ограничиваться малым интервалом когерентности отраженного сигнала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев и др. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
2. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 496 p.
3. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / ed. by L.-L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. 463 p.
4. Coastal Altimetry / ed by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 565 p.
5. Brown G. S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977. Vol. AP-25, № 1. P. 67–74.
6. Прокис Дж. Цифровая связь / пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
7. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. 376 с.
8. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 364 с.
9. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верб, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
10. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
11. Raney R. K. The Delay/Doppler radar altimeter // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. GRS-36, № 5. P. 1578–1588.

Статья поступила в редакцию 7 марта 2017 г.

**Для цитирования:** Эхосигнал спутникового высотомера с учетом доплеровского рассеяния / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиотехника. 2017. № 3. С. 46–52.

**Боровицкий Дмитрий Сергеевич** – кандидат технических наук (2016), ведущий научный сотрудник АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор более 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – широкополосные системы радиолокации и радионавигации, теория сигналов. E-mail: dmitry\_perogodin@mail.ru

**Жестерев Александр Евгеньевич** – кандидат технических наук (1982), начальник отдела АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор более 25 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация, теория связи. E-mail: zhesterev@mail.ru

**Ипатов Валерий Павлович** – доктор технических наук (1983), профессор (1985) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (2001), почетный радист СССР (1983). Автор более 250 научных работ. Сфера научных интересов – радиоэлектронная системотехника; статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов. E-mail: ival1941@yandex.ru

**Мамчур Руслан Михайлович** – магистр техники и технологий по направлению "Радиотехника" (2015), аспирант и ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов; техническая электродинамика. E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru.

D. S. Borovitsky, A. E. Zhesterev  
 JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg)  
 V. P. Ipatov, R. M. Mamchur  
 Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### The Space-Based Altimeter Echo-Signal when Doppler Scattering is taken Into Account

**Abstract.** In the analytical approximation of time dependent average power of a satellite altimeter echo-signal (power profile) the Doppler scattering of individual specular point responses is usually neglected. Meanwhile, in the modern Ka-band altimeters the Doppler shift of reflection from a point near illuminated spot edge is greater than the frequency resolution. The equation for the power profile allowing for the Doppler effect is derived. While, as expected, the profile leading edge is not influenced by the Doppler shift, there is critical discrepancy in the trailing edge behavior between ranging LFM and BPSK signals. If for the former the Doppler shift involvement does not change trailing edge steepness for the latter it makes the profile decrease much faster. Finally, the possibility to utilize the Doppler scattering to improve along-track altimeter resolution is discussed.

**Key words:** Satellite Altimeter, Echo-Signal, Doppler Scattering, LFM-Signal, BPSK-Signal, Synthetic Aperture

### REFERENCES

1. Lavrova, O. Yu. Kostianoy, A. G., Lebedev, S. A. et al. Complex Satellite monitoring of the Russians seas. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI). 2011, 470 p. (In Russian).
2. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2-d ed. Cambridge University Press, 2014, 496 p.
3. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications; ed. by L.-L. Fu, A. Cazenave. San Diego, Academic Press, 2001, 463 p.
4. Coastal Altimetry; ed by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011, 578 p.
5. Brown G. S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and its Applications. IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977, vol. AP-25, no. 1, pp. 67–74.
- 6 Proakis J. Digital Communications, 4th ed. McGraw-Hill, 2000, 800 p.
- 7 Varakin L. E. Theory of Wideband Signals. Moscow, Sov. Radio, 1970. (In Russian)
8. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications, John Wiley & Sons, 2005, 398 p.
9. Verba V. S., Neronsky L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Space-Based Radar Systems for Earth Surveying; ed. by V. S. Verba. Moscow, Radiotekhnika [Radioengineering] Publ., 2010, 680 p. (In Russian)
10. Radiotekhnicheskie sistemy: Uchebnik dlya vuzov; pod red. Yu. M. Kazarinova [Radio Engineering Systems: Textbook for High Schools]. Moscow, Vyssh. shk., 1990, 496 p. (In Russian)
11. Raney R. K. The Delay/Doppler radar altimeter // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1998, vol. GRS-36, no. 5, pp. 1578–1588.

Received Marsh, 07, 2017

**For citation:** Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. The Space-Based Altimeter Echo-Signal when Doppler Scattering is taken Into Account. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 46–52. (In Russian)

**Dmitry S. Borovitsky** – Ph.D. in Engineering (2016), leading research fellow of JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg). The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: broadband radiolocation and radionavigation systems; signals theory.

E-mail: dmitry\_nepogodin@mail.ru

**Alexander E. Zhesterev** – Ph.D. in Engineering (1982), chief of the department of JSC "Russian institute of radionavigation and time" (Saint Petersburg). The author of more than 25 scientific publications. Area of expertise: radio-location and radionavigation systems; communication theory.

E-mail: zhesterev@mail.ru

**Valery P. Ipatov** – D.Sc. in Engineering (1983), Professor (1985) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Honored scientist of the RF (2001), honorable radio-man of the USSR (1983). The author of more than 250 scientific publications. Area of expertise: radio-electronic system engineering; statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory.

E-mail: ival1941@yandex.ru

**Ruslan M. Mamchur** – Master of Science in Radio Engineering (2015), postgraduate student and assistant of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 3 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory; technical electrodynamics.

E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru