

УДК 621.383

В. Г. Шинкаренко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

## Особенности доплеровских методов в локационных лазерных системах видения

Показано, что благодаря дистанционному определению пространственной производной строки сканирования локационные лазерные системы видения способны формировать сигналы визуализации градиентного изображения, третьим измерением которого являются контуры, высота и крутизна наклона объёмных элементов объектов и рельефа местности. Определено, что доплеровские сдвиги частоты огибающей оптического сигнала, возникающие при сканировании градиентной поверхности, несут информацию о величине и знаке угла наклона объёмных элементов объектов и рельефа местности. Сделан вывод аналитических соотношений, устанавливающих зависимость доплеровского сдвига частоты поднесущей зондирующего сигнала от пространственной производной строки сканирования. Определён доплеровский сдвиг частоты бортовых лазерных локаторов бокового обзора, учитывающий особенности рельефа местности.

**Ключевые слова:** лазерные системы видения, третье измерение, доплеровский сдвиг, градиентное изображение, 3D-изображение, лазерная локация.

В последние годы развитие получают исследования и разработки локационных лазерных систем видения (ЛСВ), поскольку они сочетают как функции обычных систем, предназначенных для наблюдения объектов, так и функции лазерных локаторов, способных выполнять задачи зондирования – дистанционного определения информативных признаков изображаемых объектов, которые не зависят от контраста интенсивности отражённого излучения. Благодаря этому локационные ЛСВ имеют техническую возможность в реальном времени формировать сигналы изображения новых информативных признаков, не являющихся контрастом яркости [1]. В их числе формирование сигналов 3D-изображений объектов, у которых третьим изображаемым измерением являются такие информативные признаки, как высота, скорость объектов, доплеровский сдвиг частоты, рельеф местности, распределение яркости сюжета на заданной стробируемой дальности и др. [2, 3]. Локационные лазерные системы «стробируемого видения» позволяют наблюдать объекты, находящиеся вне поля зрения наблюдателя (например, за углом здания) [4], «раздевать» объекты, укрытые камуфляжной сеткой, листвой растительности или дымовой завесой [5, 6]. Отдельным направлением ЛСВ является прототипирование [7, 8].

Алгоритмы, методы обработки и анализ механизмов формирования сигналов изображения нового класса систем видения остаются предметом исследования и развиваются по мере совершенствования элементной базы [9, 10].

В настоящей работе анализируются локационные ЛСВ на основе доплеровских бортовых (авиационных) локаторов, способные формировать сигналы изображения, третьим измерением которых являются контуры, высота и крутизна наклона объёмных элементов объектов и рельефа местности. Такие информативные признаки зависят от пространственной производной строки сканирования. Их изображение названо *градиентным*.

Обычно анализ параметров доплеровских бортовых локаторов проводится в предположении, что сканируется плоская ламбертовская поверхность. Такой подход оправдан, если размеры луча подсветки (элемента разрешения) превышают характерные элементы микрорельефа. В противном случае элементы рельефа местности и объёмные объекты могут влиять на радиальную составляющую относительной скорости и, следовательно, изменять ожидаемый доплеровский сдвиг частоты. Возмущения доплеровского сдвига, создаваемые градиентной поверхностью, могут рассматриваться как источник искажения доплеровской

информации либо (при соответствующей обработке) как источник информации о новых информативных признаках сканируемой поверхности.

В работе учтено влияние микрорельефа местности на доплеровский сдвиг частоты с точки зрения возможности получения дополнительной информации о свойствах сканируемой поверхности, а также точности определения самого сдвига. Получены аналитические соотношения, устанавливающие зависимость доплеровского сдвига частоты бортовых лазерных локаторов от дистанционно определяемой пространственной производной строки сканирования. Проведён анализ механизма формирования сигнала градиентного изображения и получения информации о пространственной производной профиля сканируемых объёмных элементов объекта и рельефа местности. Определён доплеровский сдвиг частоты бортовых лазерных локаторов бокового обзора, учитывающий особенности рельефа местности.

### 1. Доплеровский сдвиг частоты огибающей, модулированной по интенсивности оптической несущей

Полезный сигнал доплеровских РЛС основан на определении доплеровского сдвига частоты несущей. Покажем, что доплеровский сдвиг частоты огибающей, с которой связано выделение полезного сигнала локационных ЛСВ, рассчитывается по таким же формулам, что и доплеровский сдвиг частоты несущей.

Для того чтобы сформировалась модулированная по интенсивности волна (волновой пакет), необходимы, по крайней мере, две несколько различающиеся по частоте оптические волны. Пусть таковыми будут  $S_1 = a \cos(\omega_1 t - k_1 x)$  и  $S_2 = a \cos(\omega_2 t - k_2 x)$ , где  $\omega_1, \omega_2$  – временные частоты,  $k_1, k_2$  – пространственные частоты. Результирующая волна имеет вид амплитудно-модулированного колебания:

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 = 2a \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t - \frac{k_2 - k_1}{2}x\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t - \frac{k_2 + k_1}{2}x\right) \equiv \\ &\equiv 2a \cos(\omega t - kx) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t - \frac{k_2 + k_1}{2}x\right), \end{aligned}$$

огибающая которого изменяется по гармоническому закону с частотами

$$\omega = 0,5(\omega_2 - \omega_1), \quad k = 0,5(k_2 - k_1).$$

Предположим, что волны, формирующие волновой пакет, испытывают доплеровский сдвиг. Тогда  $S'_1 = a \cos(\omega'_1 t - k'_1 x)$ ,  $S'_2 = a \cos(\omega'_2 t - k'_2 x)$ , где штрихами обозначены новые временные и пространственные частоты.

Если источник движется, например, к наблюдателю со скоростью  $V$ , где  $V$  – проекция скорости на направление визирования, то частоты принимаемого сигнала

$$\omega'_{1,2} = \omega_{1,2} \frac{c}{c - V} \approx \omega_{1,2} [1 + (V/c)] \quad (1)$$

увеличиваются за счёт доплеровского сдвига, равного

$$\omega_D = \omega'_{1,2} - \omega_{1,2} \approx \omega_{1,2} V/c,$$

где  $c$  – скорость света.

Результирующая волна по-прежнему будет иметь вид амплитудно-модулированного колебания:

$$S' = S'_1 + S'_2 = 2a \cos\left(\frac{\omega'_2 - \omega'_1}{2}t - \frac{k'_2 - k'_1}{2}x\right) \cos\left(\frac{\omega'_2 + \omega'_1}{2}t - \frac{k'_2 + k'_1}{2}x\right). \quad (2)$$

Воспользовавшись (1), найдём закон изменения огибающей (2):

$$\cos(\omega' t - k' x) = \cos[\omega(1 + (V/c)) - k' x].$$

Отсюда видно, что частота огибающей равна  $\omega' = \omega [1 + (V/c)]$ , а доплеровский сдвиг частоты рассчитываются по таким же формулам, что и частота несущей:

$$\omega_D = \omega' - \omega = \omega V/c. \quad (3)$$

Нетрудно показать, что принимаемый отражённый сигнал испытывает удвоенный доплеровский сдвиг:

$$\omega_D = 2\omega V/c. \quad (4)$$

## 2. Механизм формирования сигнала градиентного изображения

Инвариантное (не привязанное к конкретной координатной системе и закону сканирования) соотношение для мощности оптического сигнала  $P_{\Phi\Pi}$  на апертуре фотоприёмника (ФП) сканирующей ЛСВ от зондируемого участка произвольной диффузно отражающей поверхности получено в [11, 12]:

$$P_{\Phi\Pi} = \iint_{\Omega} \frac{P_L A_{\Phi}}{\pi R^2} \cos(\vec{N}_0 \vec{R}_0) \rho \frac{G(\Omega)}{\Omega_L} d\Omega, \quad (5)$$

где  $P_L$  – мощность лазера подсветки;  $A_{\Phi}$  – площадь апертуры ФП, ортогональная радиусу наклонной дальности  $R$ , направленного по оси диаграммы излучения лазера в точку визирования;  $\rho$  – локальное значение энергетического коэффициента отражения поверхности в точке визирования;  $G(\Omega)$  – нормированная на максимум диаграмма направленности излучения лазера по пространственному углу  $\Omega$ ;  $\Omega_L$  – эффективный телесный угол расходимости лазера, такой что

$$\Omega_L = \iint_{\Omega} G(\Omega) d\Omega. \quad (6)$$

Под знаком косинуса стоит угол между единичными векторами нормали  $\vec{N}_0$  к поверхности в точке визирования и радиуса наклонной дальности  $\vec{R}_0$  (рис. 1).

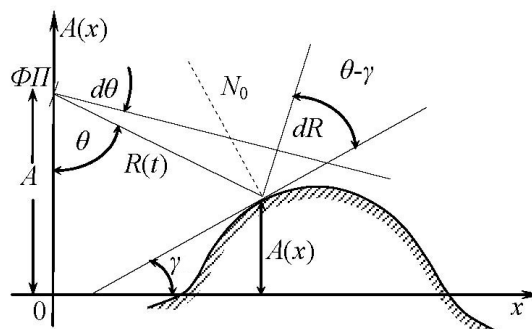


Рис. 1

Вследствие малой расходимости лазерного луча можно считать, что в пределах области интегрирования (пятна подсветки) величины  $R$ ,  $\rho$ , и  $\cos(\vec{N}_0 \vec{R}_0)$  примерно постоянны. Вынося их из-под знака интеграла, из (5) с учетом (6) получим

$$P_{\Phi\Pi} = \frac{A_{\Phi}}{R^2} P_L \rho \times \left[ \cos(\vec{N}_0 \vec{R}_0) / \pi \right].$$

Отсюда видно, что информативными в (5) являются изменения мощности полезного сигнала, создаваемые произведением коэффициента отражения на индикатрису рассеяния при сканировании объёмных объектов и (при модулированном излучении) изменении времени распространения зондирующего сигнала.

Принципиальная возможность получения сканирующими ЛСВ информации о высоте и крутизне основана на том, что огибающая модулированного по интенсивности излучения лазера подвергается при отражении не только амплитудной, но и угловой модуляции. Амплитудно-фазово-частотная модуляция огибающей отражённого зондирующего сигнала содержит информацию об отражательной способности, высоте и углах наклона объёмных элементов объекта и рельефа местности.

Действительно, например, при синусоидально модулированной мощности лазера  $P_L = P_0(1 + \cos \omega_0 t)$ , где  $P_0$  – среднее значение мощности,  $\omega_0$  – частота огибающей, отражённый луч испытывает групповую задержку, зависящую от наклонной дальности  $R(t)$  до зондируемого элемента (рис. 1). Поэтому сигнал огибающей отражённого излучения пропорционален значению

$$\cos \left[ \omega_0 \left( t - \frac{2R(t)}{c} \right) \right] = \cos \Phi(t).$$

Мгновенная фаза огибающей равна  $\Phi(t) = \omega_0 \left( t - 2 \frac{A - A(x)}{c \cdot \cos \theta(t)} \right)$ , где  $A$  – высота полёта относительно плоскости  $Z = 0$ ,  $A(x)$  – локальная высота зондируемого участка или рельеф строки сканирования,  $\theta(t)$  – текущее значение угла сканирования. Мгновенная частота огибающей равна

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega_0 - \frac{2\omega_0}{c} \frac{dR(t)}{dt} = \omega_0 - \frac{2\omega_0}{c} V_R,$$

где  $V_R$  – радиальная скорость изменения наклонной дальности. Причём изменения частоты имеют известный вид доплеровского сдвига (4):

$$\Delta\omega(t) = \omega(t) - \omega_0 = V_R 2\omega_0 / c \equiv \omega_D.$$

Зависимость мгновенной частоты от радиальной скорости означает, что сканирование градиентной поверхности, например наклонной плоскости, изменяет частоту поднесущей отраженного сигнала относительно обычного значения доплеровского сдвига. Частотное детектирование поднесущей позволит в реальном времени сформировать самостоятельный видеосигнал градиентного изображения и визуализировать информацию о пространственной производной профиля строки сканирования в качестве третьего измерения изображения.

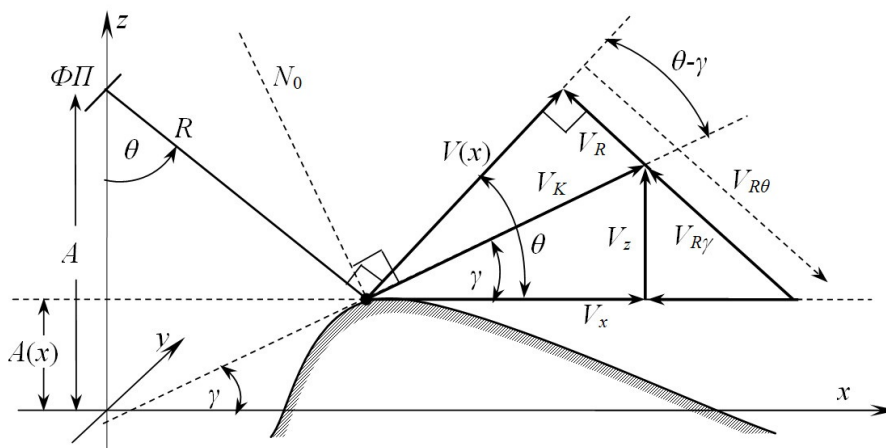


Рис. 2

Диаграмма разложения скоростей при сканировании прямого (для падающего луча) ската приведена на рис. 2. Рассмотрен случай полёта в направлении оси  $y$  и линейного сканирования вдоль оси  $x$ . Вектор линейной скорости сканирования поверхности  $\vec{V}_K$  направлен по касательной к профилю поверхности  $A(x)$  в точке визирования и равен векторной

сумме линейной скорости вращения луча  $\vec{V}(x)$  и результирующей радиальной скорости изменения наклонной дальности  $\vec{V}_R$ :  $\vec{V}_K = \vec{V}(x) + \vec{V}_R$ . В свою очередь  $\vec{V}_K = \vec{V}_x + \vec{V}_z$ , где  $\vec{V}_x$  – горизонтальная составляющая линейной скорости сканирования,  $\vec{V}_z$  – вертикальная составляющая скорости сканирования, обязанная возвышению рельефа на угол наклона касательной  $\gamma > 0$ , набегающему на сканирующий луч. Из рис. 2 видно, что сканирование прямого ската уменьшает скорость сканирования плоской поверхности, а также создаёт составляющую радиальной скорости  $\vec{V}_{R\gamma}$ , направленную к приёмнику. В итоге при сканировании прямого ската результирующая радиальная составляющая скорости равна разности радиальных скоростей сканирования плоскости  $\vec{V}_{R\theta}$  и прямого ската:

$$\vec{V}_{R \text{ прям}} = \vec{V}_R = \vec{V}_{R\theta} - \vec{V}_{R\gamma} = \vec{V}(x) \operatorname{tg} [\theta(t) - \gamma(x)]. \quad (7)$$

Согласно (3) сканирование прямого ската приводит к уменьшению доплеровского сдвига, возникающего от сканирования плоской поверхности. При сканировании плоскости величина радиальной скорости  $\vec{V}_R = \vec{V}_{R\theta} = \vec{V}(x) \operatorname{tg}\theta$  изменяется только за счёт сканирования.

Таким образом, сканирование плоской поверхности имитирует удаляющийся приёмник излучения. Доплеровский сдвиг уменьшает частоту отражённого (переизлучённого) сигнала на величину  $(V_{R\theta}/c)\omega$ . Частота отражённого сигнала, согласно (3), становится равной  $\omega [1 - (V_{R\theta}/c)]$ , а принятого –  $\omega [1 - 2(V_{R\theta}/c)]$ . Однако, если сканирующий луч встречает прямой скат, частота приближающегося источника увеличивается на величину  $(V_{R\gamma}/c)\omega$  и становится равной

$$\omega [1 - (V_{R\theta}/c)] + \omega (V_{R\gamma}/c) = \omega [1 - (V_{R\theta} - V_{R\gamma})/c] = \omega [1 - (V_{R \text{ прям}}/c)],$$

что соответствует (7). Частота огибающей принимаемого ЛСВ сигнала будет равна  $\omega [1 - 2(V_{R \text{ прям}}/c)]$ , что соответствует (4). Сканирование прямого ската, уменьшая доплеровский сдвиг, увеличивает частоту огибающей принимаемого сигнала.

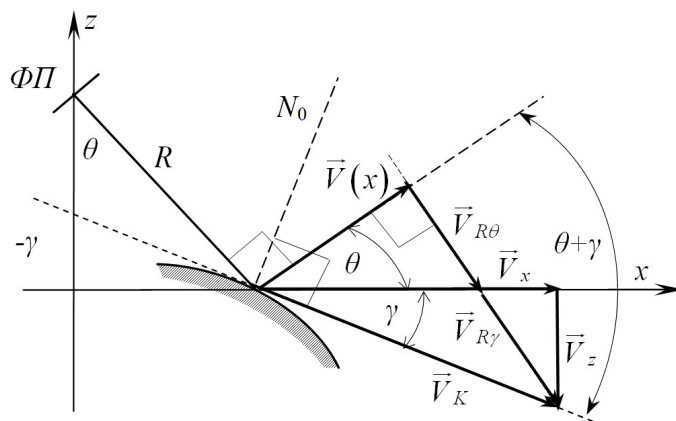


Рис. 3

Диаграмма разложения скоростей при сканировании обратного незатенённого ската приведена на рис. 3. Обозначения соответствуют рис. 2. Сканирование обратного ската увеличивает горизонтальную составляющую скорости сканирования плоской поверхности, а также создаёт составляющую радиальной скорости  $\vec{V}_{R\gamma}$ , направленную по радиусу от приёмника. В итоге при сканировании обратного ската результирующая радиальная составляющая скорости становится равной сумме радиальных скоростей сканирования плоскости  $\vec{V}_{R\theta}$  и обратного ската:

$$\vec{V}_{R \text{ обр}} = \vec{V}_{R\theta} + \vec{V}_{R\gamma} = \vec{V}(x) \operatorname{tg} [\theta + \gamma(x)]. \quad (8)$$

Согласно (3) сканирование обратного ската увеличивает доплеровский сдвиг.

Таким образом, сканирование обратного ската имитирует удаляющийся приёмник излучения. Частота сигнала для удаляющегося приёмника уменьшается на величину доплеровского сдвига  $(V_{R\gamma}/c)\omega$  и становится равной

$$\omega [1 - (V_{R\theta}/c)] - \omega (V_{R\gamma}/c) = \omega [1 - (V_{R\theta} + V_{R\gamma})/c] = \omega [1 - (V_{R \text{обр}}/c)],$$

что соответствует (8). Частота огибающей для приёмника ЛСВ будет равна  $\omega [1 - 2(V_{R \text{обр}}/c)]$ , что соответствует (4). Сканирование обратного ската уменьшает частоту огибающей принимаемого отражённого сигнала.

Аналитическое обоснование этих результатов основано на том, что в общем случае наклонная дальность  $R$  изменяется при сканировании за счёт вращения луча и изменения высоты рельефа при линейном перемещении вдоль строки:

$$R(\theta(t), x(t)) = \frac{A - A(x)}{\cos \theta(t)}. \quad (9)$$

Поэтому радиальная скорость должна выражаться через сумму сложных производных:

$$V_R = \frac{dR}{dt} = \frac{dR}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{dR}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dR}{d\theta} \Omega_{\text{СК}} + \frac{dR}{dx} V_x,$$

где  $\Omega_{\text{СК}}$  – угловая скорость сканирования,  $V_x$  – скорость перемещения точки визирования вдоль оси  $x$ . Выполняя дифференцирование (9), получим

$$V_R = R\Omega_{\text{СК}} \text{tg} \theta - \frac{V_x \text{tg} \gamma}{\cos \theta} = V(x) \text{tg} \theta - \frac{V_z}{\cos \theta} = V_{R\theta} - V_{R\gamma} \equiv V_{R \text{прям}}, \quad (10)$$

где учтено, что  $\frac{d\theta}{dt} = \Omega_{\text{СК}}$ ,  $\frac{dA(x)}{dx} = \text{grad} A(x) = \nabla_x A(x) = \text{tg} \gamma$ ,  $V(x) = R\Omega_{\text{СК}}$ ,  $V_{R\theta} = V(x) \text{tg} \theta$ . Для обратных скатов градиент строки сканирования равен

$$\nabla_x A(x) = \frac{dA(x)}{dx} = \text{tg}(180^\circ - \gamma) = -\text{tg} \gamma = \text{tg}(-\gamma).$$

Тогда из (10)

$$V_R = V(x) \text{tg} \theta + \frac{V_x \text{tg} \gamma}{\cos \theta} = V_{R\theta} + V_{R\gamma} \equiv V_{R \text{обр}}.$$

Таким образом, сканирование поверхности, градиент которой  $\text{grad} A(x) = \nabla_x A(x) = \frac{dA(x)}{dx} \neq 0$ , вызывает дополнительные изменения радиальной скорости, определяемой согласно (7), (8) соотношением

$$\vec{V}_R = \vec{V}(x) \text{tg} [\theta(t) - \gamma(x)],$$

где угол наклона касательной  $\gamma(x) > 0$  на прямых скатах,  $\gamma(x) < 0$  на обратных скатах,  $\gamma(x) = 0$  при сканировании плоской поверхности. Текущая девиация мгновенной частоты модуляции отражённого сигнала

$$\Delta\omega(t) = \omega(t) - \omega_0 = \omega_0 \frac{2V_R(t)}{c} \approx \omega_0 \frac{2A\Omega_{\text{СК}}}{c \cdot \cos \theta(t)} \text{tg} [\theta(t) - \gamma(x)]$$

содержит информацию о величине и знаке угла наклона сканируемого в данный момент элемента поверхности или объекта. Однако эта информация искажается регулярными изменениями угла сканирования  $\theta(t)$  и наклонной дальности  $R(t) = A/\cos \theta(t)$ . Но эти изменения медленные по сравнению с изменением пространственной производной – угла наклона  $\gamma(x, t)$  в момент прохождения лучом искусственного объекта с крутыми краями. Относительная величина быстрых изменений  $R(t)$  невелика по сравнению с высотой полята.

Особенности изображения объёмных объектов дали повод говорить о «неламбертовском» характере отражений лазерного излучения от проводов линий связи и даже объектов,

находящихся за пределами дифракционного разрешения оптики, которые наблюдались в экспериментах по программе Cooperative Eyesafe Radar Program (CELRAP) [13].

Особенность ЛСВ, которые снимают информацию посредством остронаправленного луча, состоит в том, что формируемое изображение зависит от индикатрисы рассеяния поверхности объекта, значит, от пространственных производных элемента поверхности, т.е. от градиентных свойств поверхности в плоскости сканирования. Отражённое излучение содержит информационную составляющую, обусловленную градиентом поверхности. При значительном градиенте возможен переменный во времени сигнал, который может обозначить наличие объекта вне зависимости от его размеров и величины коэффициента отражения.

### 3. Влияние рельефа на доплеровский сдвиг частоты лазерных локаторов бокового обзора

У локаторов бокового обзора развёртка по кадру производится за счёт путевой скорости носителя, развёртка по строке – за счёт применения веерообразной диаграммы направленности либо сканирования по углу места. Для координатной системы рис. 4 с началом координат  $O$  на поверхности сразу под движущейся платформой радиальная составляющая скорости  $\vec{V}_R$  относительно точки визирования  $P(x, z)$  на элементе разрешения равна

$$\vec{V}_R = \vec{V} \cos \alpha \cos \beta, \quad (11)$$

где  $\vec{V}$  – путевая скорость,  $\alpha$  – угол места,  $\beta$  – азимутальный угол.

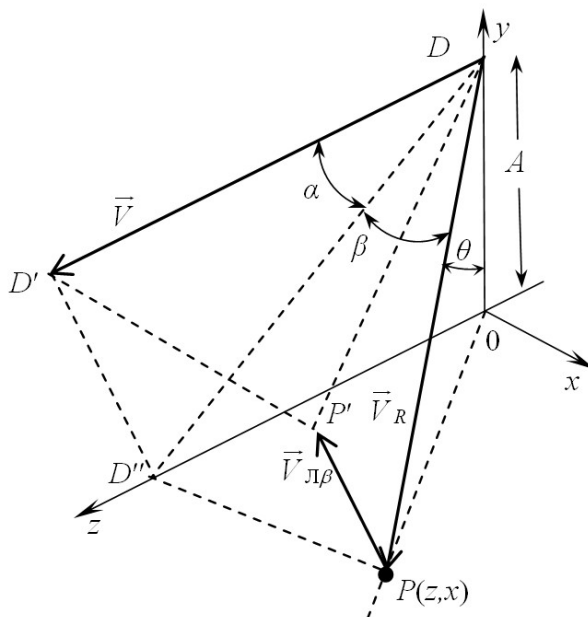


Рис. 4

Учитывая доплеровский сдвиг, частота огибающей принимаемого отражённого лазерного сигнала будет равна

$$f = f_0 + \frac{2\vec{V}_R}{\lambda_0} = f_0 + \frac{2\vec{V}}{\lambda_0} \cos \alpha \cos \beta, \quad (12)$$

где  $f_0$  – частота модуляции интенсивности оптической несущей,  $\lambda_0$  – длина волны.

Если сканируется плоская поверхность, названные углы и скорости полностью определяют положение рассеивателя и доплеровский сдвиг частоты. Однако при сканировании

градиентной поверхности неровности рельефа изменяют наклонную дальность, что влияет на радиальную составляющую скорости и вызывает зависимость доплеровского сдвига частоты от рельефа.

Рассмотрим частный случай лазерного локатора переднего обзора ( $\beta = 0$ ) при сканировании градиентной поверхности  $y = A(z, x)$  с рельефом в вертикальной плоскости  $A(z)$  (рис. 5). Путь скорости раскладывается на сумму её проекции на направление визирования – радиальную составляющую скорости  $\vec{V}_{R\theta}$  и ортогональной ей скорости  $\vec{V}_L$ . Точка визирования движется по поверхности со скоростью  $\vec{V}_K$ , направленной по касательной к профилю сканирования. Из треугольника скоростей видно, что  $\vec{V}_K = \vec{V}_L + \vec{V}_R$ , где  $\vec{V}_R$  – результирующее значение радиальной составляющей скорости. Аналогично (7) её величина равна разности радиальной составляющей  $\vec{V}_{R\theta}$ , определяемой путевой скоростью платформы, и радиальной составляющей  $\vec{V}_{R\gamma}$ , обусловленной градиентом рельефа поверхности:

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{R\theta} - \vec{V}_{R\gamma} = \vec{V}_L \operatorname{tg}(\theta - \gamma) = \vec{V} \sin \alpha \operatorname{tg}(\theta - \gamma) = \vec{V} \sin \alpha \operatorname{ctg}(\alpha + \gamma), \quad (13)$$

где  $\vec{V}_L = \vec{V} \sin \alpha$ ,  $\theta = (90^\circ - \alpha)$  – угол визирования между осью  $Y$  и  $\vec{V}_{R\theta}$ ,  $\gamma$  – угол наклона касательной в вертикальной плоскости  $D'DOD''$  (рис. 4). Радиальная составляющая, значит, и доплеровский сдвиг отличаются от соответствующих значений (11), (12) из-за учёта рельефа.

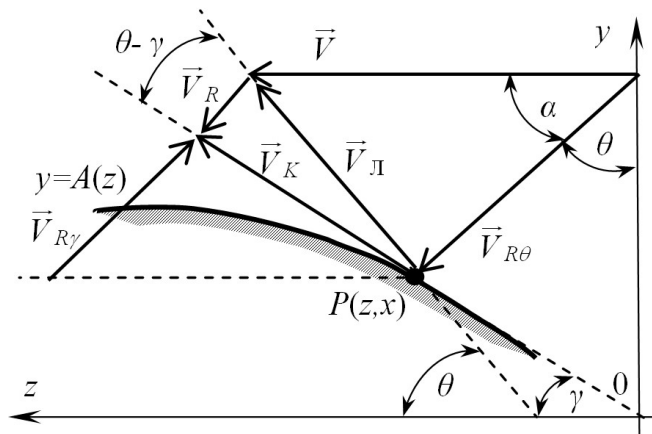


Рис. 5

Тогда для общего случая  $\beta \neq 0$  из  $\Delta PP'D$  (рис. 4) с учётом (11) и значения<sup>1</sup>  $\cos \theta = \sin \alpha \cos \beta$  определим

$$\vec{V}_{L\beta} = \vec{V}_{R\theta} \operatorname{ctg} \theta = \vec{V} \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta / \sqrt{1 - (\sin \alpha \cos \beta)^2}. \quad (14)$$

Подставив (14) в (13), найдём радиальную составляющую скорости для бокового обзора:

$$\vec{V}_R = \vec{V} \frac{\sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta}{\sqrt{1 - (\sin \alpha \cos \beta)^2}} \operatorname{tg}(\theta - \gamma'), \quad (15)$$

где  $\gamma'$  – угол наклона касательной к поверхности в вертикальной плоскости  $PP'DO$ , содержащей векторы  $\vec{V}_R$  и  $\vec{V}_{L\beta}$ . (рис. 4).

Если  $\gamma = 0$ , то  $\vec{V}_{R\theta} = \vec{V}_R$  (11) и частота отражённого сигнала определяется соотношением (12). Однако при сканировании градиентной поверхности более точное значение доплеровского сдвига даст использование для радиальной скорости выражения (15).

<sup>1</sup>Из  $\Delta D''DO$  и  $\Delta PD''D$  рис. 4 получаем  $A = DD'' \cos(90^\circ - \alpha) = DD'' \sin \alpha = DP \cos \beta \sin \alpha$ . Из  $\Delta POD$   $A = DP \cos \theta$ . Отсюда  $\cos \theta = \cos \beta \sin \alpha$ .



В частности, учёт рельефа показывает, что для переднего обзора доплеровский сдвиг (12), (13) будет отсутствовать, если  $(\alpha + \gamma) = 90^\circ$ . Из (13), (15) следует также отсутствие полезного сигнала доплеровского сдвига на прямых скатах, если  $(\theta - \gamma) = 0$ . В этом случае линия визирования совпадает с нормалью к поверхности (см. рис. 2). Нормальное падение ( $\alpha = 90^\circ$ ) на направление сканирования согласно (11), (12) не создаёт доплеровского сдвига.

При визировании в наadir «под собой» ( $\beta = 0$ ,  $\alpha = 90^\circ$ )  $\vec{V}_R = -\vec{V} \operatorname{tg} \gamma = -\vec{V} \operatorname{grad} A(z, x)_z$ . Доплеровский сдвиг возникает только при сканировании градиентной поверхности  $\gamma(x) \neq 0$ , что позволяет получить градиентное изображение. Можно показать, что в рассматриваемом случае радиальная скорость в точности равна вертикальной составляющей касательной скорости.

#### 4. Заключение

В работе показана способность сканирующих локационных лазерных систем видения формировать сигналы визуализации градиентного изображения, третьим измерением которого являются контуры, высота и крутизна наклона объёмных элементов объектов и рельефа местности. Сигнал изображения таких информативных признаков определяется пространственной производной строки сканирования.

Сделан вывод аналитических соотношений, устанавливающих зависимость доплеровского сдвига частоты поднесущей оптического зондирующего сигнала от дистанционно определяемой пространственной производной строки сканирования. Определён доплеровский сдвиг частоты бортовых лазерных локаторов бокового обзора, учитывающий особенности рельефа местности.

Показано, что физический механизм формирования сигнала градиентного изображения обязан изменениям радиальной скорости, возникающим при сканировании градиентной поверхности. Доплеровские сдвиги частоты огибающей оптического сигнала, вызванные этими изменениями, несут информацию о величине и знаке угла наклона объёмных элементов объектов и рельефа местности.

Изменения доплеровского сдвига являются информативными для локационных лазерных систем видения, формирующих градиентное изображение.

#### Литература

1. Шинкаренко В.Г. Локационные лазерные системы видения с формированием трёхмерных данных элементов изображения // Успехи современной радиоэлектроники. — 2004. — № 11. С. 3–46.
2. Carswell Allan I. Advanced in Laser Ranging // Proc. of SPIE. — 2004. — V. 5240. P. 1–9.
3. Krause Brain, Gatt Philip, Embry Carl, Buck Joe. High-Resolution 3D Coherent Laser Radar Imaging // Proc. of SPIE. — 2006. — V. 6214.
4. Repasi Endre, Lutzmann Peter, Steinvall Ove, Elmquist Magnus, Gohler Benjamin, Anstett Gregory. Advanced short-wavelength in infrared range-gated imaging for ground application monostatic and bistatic configurations // Applied Optics. — 2009. — V. 48, N 31. — P. 5856–5966.
5. Gschwendner Alfred B., Keicher William E. Development of Coherent Laser Radar at Lincoln Laboratory // Linc. Lab. J. — 2000. — V. 12, N 2. — P. 383–396.
6. Marino Richard M., Keicher William E. Jigsaw: A Foliage-Penetrating 3D Imaging Laser Radar System // Linc. Lab. J. — 2005. — V. 15, N 1. — P. 383–396.
7. D'Apuzzo Nicola. Overview of 3D surface digitization technologies in placeEurope // Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging. — 2006. — V. 6956. — P. 695605-1–695605-13.
8. Busck Jenis, Heiselberg Henning. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar // Applied Optics. — 2004. — V. 43, N 24. — P. 4705–4710.

9. *Stan B.L., Abou-Auf A., [et. al].* Research progress on scannerless ladar systems using a laser diode transmitter and FM/cw radar principles // Proc. of SPIE. — 2001. — V. 4377. — P. 12–22.
10. *Heinrichs Richard M., Aull Brain F. [et. al].* Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays // Proc. of SPIE. — 2001. — V. 4377. — P. 106–117.
11. *Шинкаренко В.Г., Караваев А.Д.* Расчёт мощности оптического сигнала лазерной сканирующей системой видения // Радиотехника. — 1989. — № 6. — С. 72–74.
12. *Шинкаренко В.Г.* Импульсная характеристика оптического канала сканирующей лазерной системы видения // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2003. — № 11–12. — С. 87–93.
13. *Hutchinson, James A.; Trussell, Charlie W.; Allik, Toomas H.; Hamlin, Scott J.; Force, Jason D.; Crawford, Ian D.; McCarthy, Jack C.; Bowers, Mark S.; Jack, Michael D.* Multifunction laser radar: III // Proc. of SPIE.— 2001.— V. 4377. — P. 132–146.

*Поступила в редакцию 08.06.2012.*