

УДК 534.321.9

ОБНАРУЖЕНИЕ СДВИГА ВЕТРА НА МАЛОЙ ВЫСОТЕ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА СВЧ И ОПТИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

С.А. ДУБЯНСКИЙ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Рубцовым В.Д.

Рассматривается метод обнаружения сдвига ветра и турбулентности атмосферы на взлетно-посадочной полосе (ВПП) на базе параметрических регистрирующих устройств на СВЧ и оптическом лучах. Приводятся результаты исследования чувствительности регистрирующих устройств при использовании этих лучей.

Ключевые слова: сдвиг ветра, турбулентность атмосферы, воздушное судно (ВС), регистрирующее устройство, СВЧ и оптический лучи.

Существующие в настоящее время технические средства обнаружения сдвига ветра в аэродромной зоне разделяются на наземные и бортовые.

В [2] предложен принцип регистрации волновых возмущений в среде с помощью узконаправленных зондирующих (СВЧ, оптических либо ультразвуковых) лучей, который может быть использован для построения устройств обнаружения сдвига ветра на малой высоте одновременно на больших пространствах и турбулентных пульсаций атмосферы на ВПП с передачей в реальном масштабе времени информации об опасных атмосферных возмущениях на борт ВС, находящихся в аэродромной зоне. Принцип работы регистрирующего устройства на зондирующих лучах заключается в выделении накопленных по длине луча продуктов параметрического взаимодействия волновых возмущений среды с колебаниями в луче.

В [2] рассматривалось возмущение среды в виде плоской синусоидальной акустической волны. При этом было показано, что девиация фазы колебаний в луче, вызванная изменением скорости распространения волн, под воздействием этого возмущения равна $\delta\psi(\rho, \alpha) = \Delta\psi \left| \sin \left[\pi \rho (\cos \alpha - g) \right] / \pi \rho (\cos \alpha - g) \right|$, где $\rho = L/\lambda$, $g = a/c$, L и λ - длины луча и волны регистрируемых колебаний, a и c - скорости распространения акустической волны и волны в зондирующем луче; α - угол между лучом и направлением распространения возмущения; $\Delta\psi = (2\pi f L / c^2) (dc/dP) \delta P$ - максимум девиации фазы; f - частота волн в луче; δP - избыточное давление, вызванное возмущением среды; dc/dP - крутизна зависимости $c(P)$ при приеме акустических волн в воздухе на оптический луч, равная 81 м/с мбар [2] (анализ показал, что это справедливо и для волн СВЧ диапазона).

При использовании электромагнитного (оптического или СВЧ) луча ($g \approx 0$) максимум $\delta\psi(\rho, \alpha)$ имеет место при $\alpha = \pm\pi/2$, т.е. при условии, что луч лежит в плоскости фронта волны возмущения. При этом ширина главного лепестка диаграммы направленности по нулевому уровню, характеризующая направленные свойства регистрирующего устройства, определяется выражением $\delta\alpha = (2/\rho) \text{ рад}$.

Для накопления полезного эффекта в зондирующем луче необходимо, чтобы за время распространения в нем волн $\tau = L/c$ волновой процесс существенно не изменился. При этом полоса пропускания устройства равна $\delta f = 1/\tau = c/L$.

Несмотря на то что возмущение воздушной среды в виде сдвига ветра существенно отличается от указанной выше модели возмущения, полученные соотношения для расчета чувствительности и полосы пропускания регистрирующего устройства на зондирующих лучах применимы и в рассматриваемом случае. При этом линия сдвига ветра (она же - линия скачка давления) может рассматриваться как линия фронта некоего псевдозвукового возмущения

с величиной избыточного давления δP порядка нескольких миллибар. Возмущение в виде турбулентности может рассматриваться как случайное псевдозвуковое возмущение, величина которого характеризуется среднеквадратическим отклонением (СКО) избыточного давления δP . При этом турбулентность, обусловленная сдвигом ветра, будучи вторичным по отношению к сдвигу ветра возмущением, очевидно, характеризуется величиной избыточного давления, меньшей его величины при сдвиге ветра.

Вопросы аппаратурной реализации устройств регистрации волновых возмущений на СВЧ и оптическом зондирующих лучах рассмотрены в [3].

Для сравнительной оценки чувствительности устройств регистрации волновых возмущений на СВЧ и оптическом лучах произведем анализ максимума девиации фазы. Примем следующие значения параметров зондирующих лучей: $f=9,4 \cdot 10^9$ Гц - для СВЧ луча, что соответствует длине волны $\lambda_0=3,2$ см; $f=4,8 \cdot 10^{14}$ Гц - для оптического луча, что соответствует длине волны $\lambda_0=0,63$ мкм колебаний, генерируемых газовым (Ne-He) лазером; $L=300$ м - для СВЧ луча, что соответствует максимальной ширине воздушного коридора в зонах взлета и посадки ВС; $L=10$ м - для оптического луча; $c=3 \cdot 10^8$ м/с - для СВЧ и оптического лучей; $dc/dP=81$ м/с мбар - для СВЧ и оптического лучей; $\delta P=2$ мбар - для регистрации сдвига ветра; $\delta P=0,1$ мбар - для регистрации турбулентности.

Расчет показывает, что максимум девиации фазы $\Delta\psi$ при регистрации сдвига ветра и турбулентности в зонах взлета и посадки ВС с помощью устройства на СВЧ луче соответственно равен $3,2 \cdot 10^{-2}$ рад и $1,6 \cdot 10^{-3}$ рад. При использовании в указанных целях устройства на оптическом луче девиация фазы составляет 54 рад (8,6 фазовых циклов) и 2,7 рад. При развертывании устройств на СВЧ луче длиной $L=3$ км по периферии аэродрома и вдоль ВПП значения $\Delta\psi$ возрастут в 10 раз и составят $3,2 \cdot 10^{-1}$ рад и $1,6 \cdot 10^{-2}$ рад. Дальнейшее повышение чувствительности регистрирующего устройства может быть достигнуто при переходе к СВЧ сигналу в зондирующем луче миллиметрового диапазона. Так при длине волны в СВЧ луче $\lambda_0=8$ мм, которой соответствует частота $f=3,8 \cdot 10^{10}$ Гц, в последнем рассматриваемом случае значения $\Delta\psi$ возрастут до 1,3 рад и $6,4 \cdot 10^{-2}$ рад.

Заметим, что использование регистрирующего устройства на СВЧ луче предпочтительнее использования устройства на оптическом луче в связи с большей зависимостью последнего от погодных условий, в частности, от наличия осадков, а также от помех в виде микросейсмиков. Недостаток устройства на СВЧ луче, заключающийся в его меньшей по сравнению с устройством на оптическом луче чувствительности, может быть устранен путем использования для выделения информации методов микрофазометрии, позволяющих регистрировать фазовые сдвиги порядка 10^{-8} рад [4].

Принцип работы микрофазометра, разработанного на основе изложенных в [4] принципов микрофазометрии, иллюстрируется на рис. 1. Устройство работает следующим образом. Производится периодическое векторное вычитание колебаний, разность фаз между которыми измеряется (рис. 1а): $U_1(t)=U_m \sin(vt - \psi_1)$ и $U_2(t)=U_m \sin(vt - \psi_2)$ из опорного сигнала $U_0(t)=U_m \sin vt$. При этом амплитуды всех трех сигналов должны быть выровнены до одной величины U_m . При условии $\psi_i < \pi/2$, $i=1, 2$, обеспечивающем выполнение приближенного равенства $\operatorname{tg} \psi_i \cong \psi_i$, $i=1, 2$, формируется амплитудно-модулированное колебание с глубиной модуляции, определяемой разностью фаз колебаний $U_1(t)$ и $U_2(t)$ (рис. 1б).

При этом амплитуда этих колебаний с периодом $T=2\pi/\Omega$, где Ω - частота коммутации устройства векторного вычитания колебаний, изменяется, принимая значения $\Delta U_i \cong U_m \psi_i$, $i=1, 2$, причем изменение амплитуды пропорционально измеряемому фазовому сдвигу $\Delta U=U_2-U_1 \cong U_m (\psi_2-\psi_1)=U_m \Delta \psi$.

Во избежание подавления слабого сигнала помехой при детектировании оно осуществляется с помощью синхронного детектора (СД). При этом появление сигнала частоты Ω на

выходе фильтра, включенного после СД, свидетельствует о наличии фазового сдвига между колебаниями $U_1(t)$ и $U_2(t)$, причем амплитуда выходного сигнала пропорциональна этому фазовому сдвигу $U_{\text{вых.}} = k_d \Delta U = k_d U_m \Delta \psi$, где k_d - коэффициент передачи СД. Частота коммутации Ω должна выбираться из условия $\Omega_{\text{д.макс.}} \leq \Omega \ll \nu$, где $\Omega_{\text{д.макс.}}$ - максимальная частота «дрейфа» процесса. При использовании микрофазометра совместно с регистрирующим устройством на СВЧ луче опорный сигнал $U_0(t)$ на его вход должен подаваться с выхода радиоприемного устройства канала передачи опорной фазы [2], а сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$ с выходов фазовращателя в кольце фазовой автоподстройки, осуществляющей подстройку среднего значения фазы сигнала с выхода СВЧ радиоприемного устройства под фазу опорного сигнала, передаваемого по УКВ каналу передачи опорной фазы, и дополнительного фазовращателя - на выходе этого канала, назначение которого - обеспечение определенного уровня несущей амплитудно-модулированного сигнала $U(t)$, полученного в результате векторного вычитания сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$.

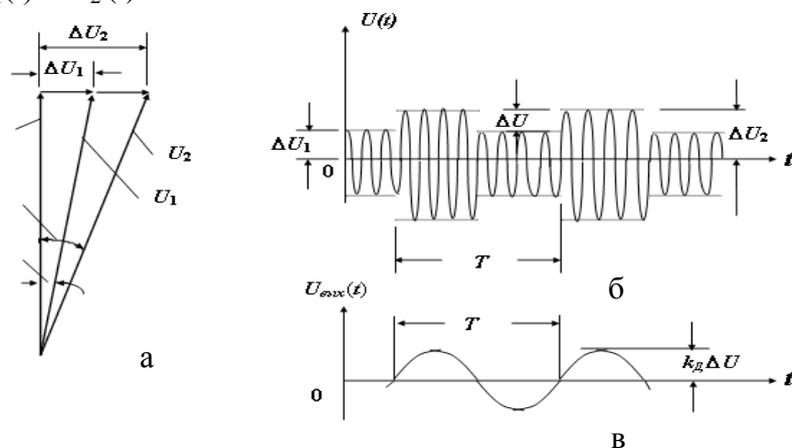


Рис. 1

С учетом отмечавшейся выше высокой чувствительности регистрирующего устройства на оптическом луче наиболее целесообразно его использование для регистрации существенно более слабой по сравнению со сдвигом ветра турбулентности на ВПП. На рис. 2 представлена структурная схема такого устройства. Оптический луч, формируемый ОКГ, с помощью расщепителя света (РС) и двух отражателей (Отр.) расщепляется на два параллельных луча, разнесенных на расстояние, превышающее интервал пространственной корреляции R регистрируемых пульсаций атмосферы так, чтобы флуктуации фазы в разнесенных лучах, обусловленные этими пульсациями, могли считаться взаимно некоррелированными, что обеспечивает суммирование дисперсий флуктуаций фазы накопленных в этих лучах. Далее с помощью еще одного отражателя и пьезоэлемента (ПЭ) с отражающей поверхностью лучи поступают на фотоприемник (ФП). Фазовая автоподстройка колебаний в одном из лучей, обеспечивающая в ФП режим приема «на темном фоне», осуществляется таким же образом, как и в схеме, представленной на рис. 2.

Полезный сигнал с выхода усилителя (U_c) поступает на пороговое устройство (ПУ) и коррелятор (Кор.). В случае если оцениваемые в этих устройствах СКО флуктуации фазы $\delta\psi_{\text{П}}$, вызванные турбулентными пульсациями атмосферы, и интервал временной корреляции τ_K этих флуктуаций удовлетворяют условиям: $\delta\psi_{\text{П}} > \delta\psi_{\text{П макс.}}$; $\tau_{K \text{ мин.}} < \tau_K < \tau_{K \text{ макс.}}$, где $\delta\psi_{\text{П макс.}}$, $\tau_{K \text{ мин.}}$ и $\tau_{K \text{ макс.}}$ - предельные значения соответствующих параметров, характеризующие область опасных атмосферных возмущений, то в регистрирующем устройстве (РУ) регистрируется факт возникновения таких возмущений, о чем по каналу связи передается информация на борт ВС, заходящего на посадку или готовящегося к взлету. Заметим, что интервал временной корреляции флуктуаций фазы колебаний в луче τ_K связан со средним размером вихрей $r_{\text{Ср}}$ оче-

видным соотношением $\tau_K \cong r_{Cp}/a$, где a - скорость распространения возмущений. Опасными являются возмущения, при которых величина r_{Cp} соизмерима с размерами планера ВС.

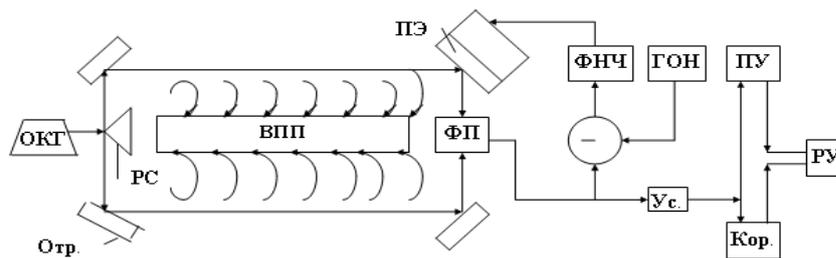


Рис. 2

Дифференциальный принцип построения устройства регистрации опасных атмосферных возмущений (рис. 2), предполагающий вычитание оптических колебаний в параллельных лучах при их попадании на ФП, работающий «на темном фоне», позволяет исключить влияние на работу устройства дестабилизирующих факторов, имеющих радиус пространственной корреляции, превышающий разнос параллельных лучей, поскольку результат влияния этих факторов компенсируется при вычитании колебаний в ФП. К таким дестабилизирующим факторам можно отнести изменения температуры и атмосферного давления, вызванные изменениями погодных условий, а также сейсмические помехи, вызванные микросейсмами в районе аэродрома, поскольку радиус пространственной корреляции последних существенно превышает радиус пространственной корреляции регистрируемых атмосферных возмущений, что связано с существенно большей скоростью распространения сейсмических волн в грунте по сравнению со скоростью распространения атмосферных возмущений.

По существу, рассматриваемое устройство регистрации опасных атмосферных возмущений можно рассматривать как своего рода пространственный фильтр высоких частот, выделяющий только те возмущения, радиус пространственной корреляции которых не превышает расстояния между разнесенными лучами, осуществляющими зондирование воздушной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин И.Ф. Влияние сдвига ветра на безопасность полетов воздушных судов. Итоги науки и техники // Воздушный транспорт. - 1980. - Т. 8.
2. Рубцов В.Д. Прием волновых возмущений при помощи узконаправленных колебаний // Радиотехника и электроника. - 1997. - Т. 42. - № 6.
3. Рубцов В.Д., Дубянский С.Н. Определение акусто-эмиссионных характеристик воздушных судов с использованием параметрических регистрирующих устройств на СВЧ и оптических лучах // Статья в настоящем Вестнике.
4. Бернштейн И.Л. Опыт Саньяка на радиоволнах // Доклады АН СССР. - 1950. - Т. 36. - № 4.

DISCLOSURE OF WIND SHIFT ON SMALL HEIGHT AND ATMOSPHERIC TURBULENCE ON TAKE-OFF - LANDING STRIPE WITH USE REGISTER ARRANGEMENTS ON MICROWAVE AND OPTICS BEAMS

Dubyanskiy S.A.

The method of detecting of wind shear at low height and atmospheric turbulence on take-off and landing runways with the use of parametric register arrangements on microwave and optics beams are considered. The results of the research of register arrangements response when these beams are being used.

Keywords: wind shift, atmospheric turbulence, register arrangement, aircraft, microwave and optics beams.

Сведения об авторе

Дубянский Сергей Александрович, 1986 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (2009), соискатель МГТУ ГА, эксперт ООО «Альфа-серт», автор 8 научных работ, область научных интересов - радиофизика, радиотехника, нанотехнология, эксплуатация воздушного транспорта.