

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ IPDA-ЛИДАРА С ГЕТЕРОДИННЫМ  
ПРИЕМНИКОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ  
КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИЗ КОСМОСА**

**С.В. Бабченко, Г.Г. Матвиенко, А.Я. Суханов**

**POSSIBILITIES OF USING IPDA-LIDAR WITH HETERODYNE RECEIVER  
FOR MEASURING SURFACE CARBON CONCENTRATION  
WHEN SOUNDING FROM SPACE**

**S.V. Babchenko, G.G. Matvienko, A.Ya. Sukhanov**

Ранее в наших работах (Матвиенко Г., Креков Г., Суханов А.) и зарубежных авторов (Ehret G.) была показана принципиальная возможность измерений концентраций некоторых парниковых газов (метан, углекислый газ, закись азота) с орбиты 450 км при применении технологии IPDA зондирования (интегральное дифференциальное поглощение по трассе). Данная технология основана на приеме отраженного от топографической мишени сигнала и оценке приповерхностной концентрации газа с использованием весовых функций. В качестве приемников нами были рассмотрены приемники прямого детектирования, данные приемники с применением усиления в инфракрасном диапазоне имеют высокий уровень шумов.

Оптическое смешение сигналов и гетеродин прием являются перспективными механизмами для понижения влияния шумов, что может понизить требования к мощности излучателя сигнала и размеру приемного телескопа, по сравнению со схемой прямого детектирования. В данной работе оценивается погрешность измерений концентрации парниковых газов при гетеродин приеме. Приводятся параметры лидарной системы, при которых случайная погрешность восстановления приповерхностной относительной концентрации CO<sub>2</sub> ниже 0.2 %.

It has been shown (Matvienko G., Krekov G., Sukhanov A., Ehret G. and etc) principle possibility to measure the concentrations of greenhouse gases (methane, carbon dioxide, nitrous oxide) from an orbit of 450 km in the application of technology IPDA sensing (integral path differential absorption). This technology is based on return signal accumulation from the target and topographical evaluation subsurface gas concentration using weighting functions. As we have examined the receiver for direct detection receivers, these receivers using infrared amplification have a high noise level. Optical heterodyne mixing are mechanism for reducing the prospective effect of noise, that can reduce power of laser and receiving telescope aperture, compared with direct detection scheme. In this paper, the measurement error is estimated concentrations of greenhouse gases in heterodyne detection. Parameters lidar system in which random error recovery subsurface relative CO<sub>2</sub> concentration below 0.2 % are presented.

В целях повышения надежности определения источников и стоков парниковых газов различными исследователями проводятся оценки возможностей измерения CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с борта космической платформы на основе IPDA лидара. Например, европейское космическое агентство уже в ближайшие годы планирует запуск соответствующих платформ с соответствующими лидарами на борту (миссия A-Scorpe, Merlin). В рамках указанных направлений нами проведена оценка влияния многократного рассеяния на точность измерения газовых составляющих. Определено что влияние многократного рассеяния присутствует только при наличии плотных облачных образований и больших углах приема, при этом увеличивается уровень мощности сигнала на каждой из длин волн, но влияние многократного рассеяния нивелируется при дифференциальной схеме зондирования [Matvienko, 2014, Бабченко, 2015]. В качестве метода приема рассматривалось прямое детектирование, в работе [Ehret et al., 2008] рассмотрены также возможности зондирования с применением гетеродинного приема. Кроме того, в [Ehret et al., 2008] отмечается (на то время) недостижимость точности восстановления концентрации углекислого газа 0.2 % при заданных параметрах в районе длин волн работы излучателя 1.57 мкм. Наши исследования также направлены на оценки возможностей зондирования концентрации парниковых газов с борта космической платформы лидарными методами (с использованием принципов гетеродинного приема) и создание для этого соответствующего программного обеспечения. Принципы

гетеродинирования оптического излучения и гетеродинного лидарного зондирования можно найти в [Хинкли, 1979]. Принцип гетеродинного приема можно описать следующим образом: на фотодиод, являющимся квадратичным прибором, падает излучение локального осциллятора (LO) и отраженного лидарного сигнала со случайной фазой φ.

$$E_{LO}(t) = E_{LO} \exp(-i\omega_{LO}t)$$

$$E(t) = E \exp(-i(\omega t + \varphi)) \quad (1)$$

Измеряемый на нем фототок  $i$ , определяемый интенсивностью падающего на него излучения для монохроматической линейно поляризованной волны будет определяться следующим образом:

$$i(t) = \frac{1}{2} K S \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} \times \left\langle |E_{LO}(t)|^2 + (E_{LO}(t)E_{LO}^*(t)E(t)) + |E(t)|^2 \right\rangle, \quad (2)$$

где  $K$  – чувствительность фотодиода в А/Вт. Преобразуя данное выражение и выражая через мощность падающий сигнал, получим выходной фототок, где присутствует постоянная часть суммы мощности излучения осциллятора и сигнала и составляющая на разностной частоте:

$$i(t) = K \left( 2\sqrt{P P_{LO}} \cos((\omega - \omega_{LO})t + \varphi) + P + P_{LO} \right). \quad (3)$$

Таким образом, возможно усиление лидарного сигнала за счет повышения мощности локального осциллятора, кроме того, появляется возможность за счет перенесения сигнала в низкочастотный диапа-

Параметры лидарной системы космического базирования

$Q$ , квантовая эффективность	0.8
$B$ , электрическая полоса пропускания, МГц	3
$R=Qe/h\nu$ , чувствительность детектора	1.012
$\tau_L$ , длина импульса, нс	70
Энергия в импульсе, Дж	1
Расходимость лазерного пучка, мрад	0.1
Поле зрения приемника, мрад	10, 1, 0.1
$i_D$ , плотность темнового тока	$160 \text{ fA/Hz}^{0.5}$
$i_0$ , плотность шума входного тока	$4 \text{ fA/Hz}^{0.5}$
$u_0$ , плотность шума входного напряжения	$3 \text{ nV/Hz}^{0.5}$
$T$ , температура	290 К
$R_F$ , сопротивления с обратной связью	1 МΩ
$C_{\text{det}}$ , эквивалентная емкость детектора	4 пФ
Высота орбиты, км	450
Радиус приемного зеркала, м	0.5
Скорость спутника, км/с	7.64
Отражательная способность	0.0314

зон радиоизлучения применить методы спектрально-анализа с высоким разрешением. Естественно при этом необходимо соблюдать одинаковую поляризацию и параллельность падающих волн на фотодиод.

К действующим и влияющим на точность измерений фотодиодом шумам относятся тепловой шум (или Найквиста), дробовый шум (или Шоттки), фотонный шум. Их можно учесть в следующем выражении:

$$\begin{aligned} \langle \Delta I_N^2 \rangle = & \\ = 2 & \left[ 2eM^2FK(P + P_{LO} + P_b)i_D^2 + i_0^2 + \frac{4k_bT}{R_F} + \left( \frac{u_0}{R_F} \right)^2 \right] + \\ + \frac{B^3}{3} & (u_0 2\pi C_d)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

где  $B$  – электрическая полоса пропускания,  $e$  – элементарный заряд электрона,  $F$  – фактор избыточного шума обусловленный внутренними свойствами усилителя,  $i_D^2$  – плотность темнового тока,  $R_F$  – сопротивление с обратной связью,  $i_0^2$  – плотность шума входного тока,  $T$  – абсолютное значение температуры,  $u_0^2$  – плотность шума входного напряжения,  $C_d$  – эквивалентная емкость детектора, включая емкость усилителя и проводки,  $P_b$  – фоновый сигнал обусловленный рассеянным и отраженным солнечным излучением или термическим излучением в спектральном диапазоне приема, полностью не устраненными фильтрами,  $F$  – фактор избыточного шума,  $M$  – коэффициент усиления приемника.

Средняя мощность полезного сигнала на нагрузке фотодетектора в соответствии с (3) будет равна:

$$\langle I_s(t)^2 \rangle R_f = 2K^2 P P_{LO} P_f \quad (5)$$

Таким образом, отношение сигнал шум можно представить как:

$$SNR = \frac{\langle I_s(t)^2 \rangle}{\langle \Delta I_N^2 \rangle} \quad (6)$$

В настоящее время в инфракрасном диапазоне создаются фотодетекторы на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InAlAs/GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, имеющие низкий уровень темновых токов, высокий уровень чувствительности и обнаружительной способности [Гаврилов, 2011, Андреев, 2010, 2013, Яковлева, 2014]. В работе [Гаврилов, 2011] выделяется два основных вида фотоприемников, с низкими шумами по напряжению менее чем  $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , но значительными токовыми шумами (единицы  $\text{нА}/\sqrt{\text{Гц}}$ ), или с самыми низкими токовыми шумами (единицы  $\text{фА}/\sqrt{\text{Гц}}$ ), но значительными значениями шумов по напряжению (единицы  $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ). Для случая гетеродина не имеет смысла рассматривать лавинные фотодиоды с усилением, имеет смысл рассматривать PIN диоды потому можно положить  $M=F=1$ .

При расчете формулы (6) максимальное отношение сигнал шум достигается при определенном уровне мощности лазера гетеродина и далее остается постоянной, чем меньше уровень темновых токов, ниже шум по напряжению и выше динамическое сопротивление фотодиода, тем меньше необходимая мощность излучателя гетеродина. При уровнях сопротивления 1–5 МΩ выгоднее рассматривать фотодиоды второго типа с самыми низкими темновыми шумами. При этом для системы с параметрами из таблицы, уровень SNR 1–1.5 достигается при уровнях мощности локального осциллятора  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  Вт, и мощности приходящего сигнала  $5 \cdot 10^{-12}$  Вт, с ростом приходящей мощности SNR растет пропорционально. В данном случае в зависимости от эффективного времени приема в пределах 75–200 нс, уровень энергии длины волны ON должен быть 0.1–0.3 мДж,

для повышения отношения сигнал шум необходимо увеличивать энергию импульса или организовать режим накопления. Для высоты спутника 400–450 км, с учетом основного вклада в рассеянный и отраженный сигнал на низких высотах, можно считать что сигнал рассеяния на высотах 20–30 км и выше мал, особенно на длинах волн 2 мкм, тогда частоту импульсов можно принять равной 5–7.5 кГц.

Погрешность дифференциальной оптической толщи можно рассчитать по формуле:

$$\langle \Delta \delta_{gas} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \frac{1}{SNR(\lambda_{on})} + \frac{1}{SNR(\lambda_{off})} \right)},$$

где  $N$  – число импульсов накопления.

Относительная концентрация газа будет равна:

$$p_g(h) = \frac{p_g^m(h) \Delta \tau_g^*}{p(h) \int_0^H p_g^m(h) \Delta K(T(h), p(h)) dh},$$

где  $p_g^m(h)$  – парциальное давление модельного вектора концентрации,  $\Delta K(T(h), p(h))$  – дифференциальный коэффициент поглощения,  $p(h)$  – давление на высоте  $h$ .

Случайная погрешность, обусловленная дифференциальной оптической толщиной будет равна:

$$\Delta p_g = \frac{p_g^g(h)}{p(h) \int_0^H p_g^m(h) \Delta K(T(h), p(h)) dh} \langle \Delta \delta_{gas} \rangle$$

Фоновый сигнал в районе 1.5–1.6 мкм взят на основе данных работы [Ehret et al., 2008] при зенитном угле солнца  $75^\circ$ , при этом энергетическая яркость отраженного и испускаемого единицей поверхности излучения изменяется в пределах 1–5 мВт/м<sup>2</sup>·нм·ср, для диапазона 2–2.3 мкм взято значение 0.5 мВт/м<sup>2</sup>·нм·ср.

Относительная случайная погрешность восстановления концентрации CO<sub>2</sub> на длинах волн ON=1572.025 нм и OFF=1572.2 нм достигает 0.2 % при уровне энергий сигналов 0.3 мДж, частоте импульсов 7500 Гц, и полосе пропускания приемника 10 МГц. При понижении энергии сигнала и повышении полосы пропускания приемника случайная ошибка растет пропорционально их значениям.

Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С. и др. Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2–5 Гц // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, №. 8. С. 1109–1115.

Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С. и др. Быстродействующие р–i–n-фотодиоды для спектрального диапазона 0.9–2.4 мкм // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, №. 9. С. 43–49.

Бабченко С.В., Матвиенко Г.Г., Суханов А.Я. Оценки возможностей зондирования парниковых газов CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> над подстилающей поверхностью IPDA лидаром космического базирования // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 01. С. 37–45.

Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю. Пределная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов АЗ В5 среднего ИК-диапазона спектра // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 18. С. 50–57.

Хинкли Э. Д. Лазерный контроль атмосферы. Издательство «Мир», 1979.

Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. Исследование фотодиодных лавинных элементов матричных фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2, № 4. С. 374–382.

Ehret G., Kiemle C., Wirth M., Amediek A. Space-borne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: A sensitivity analysis // Appl. Phys. 2008. V. 90. P. 593–608.

Matvienko G.G., Sukhanov A.Ya. Software system for simulation IPDA lidar sensing from space platform // SPIE Proceedings. 2014. V. 9292.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, Томск