

Л.Р. Айбатов

## Анализ возможности повышения энергетических характеристик непрерывных ЛЧМ-лидаров

Казанский государственный технический университет им. А.Н.Туполева

Поступила в редакцию 29.04.2005 г.

Представлены результаты анализа лидарного уравнения для лидаров с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) интенсивности зондирующего излучения. Произведен анализ работы фоторезистора в режиме радиогетеродинамирования. Показано, что режим радиогетеродинамирования позволяет уменьшить на несколько порядков пороговую мощность принимаемых сигналов и соответственно повысить энергетические характеристики лидаров с ЛЧМ интенсивности зондирующего излучения в ИК-диапазоне. Рассмотрены принципы работы когерентного ЛЧМ-лидара с хранением фазы опорного излучения. Применение устройств хранения фазы обеспечивает многократное (до пяти порядков) увеличение длины зондируемой трассы при сохранении взаимной когерентности опорного и принимаемого излучений, позволяя применять полупроводниковые лазеры в системах с дальностью действия до 10 км.

Непрерывные лидары с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) оптического сигнала обеспечивают возможность обнаружения различных примесей с пространственным разрешением при малой мощности зондирующего излучения [1,2]. Принцип действия ЛЧМ-лидаров основан на возможности сохранения энергетических характеристик радиолокационных систем [3] при переходе от импульсного режима работы к непрерывному при большом времени накопления. Анализ [3] выполнен для линейного режима детектирования принимаемого сигнала и непосредственно применим к когерентным ЛЧМ-лидарам с гетеродинным приемом оптического излучения [2].

В таких системах фотосмеситель работает в линейном режиме, а собственными шумами фотодетектора можно пренебречь по сравнению с внешними шумами [4]. Однако данный режим работы требует применения лазеров с высокой временной когерентностью излучения, что ограничивает сферу применения когерентных ЛЧМ-лидаров. В лидарах с ЛЧМ интенсивности оптического излучения [1] фотоприемник работает в режиме прямого фотодетектирования, который отличается квадратичностью характеристик [4]. При этом обнаружительная способность  $D^*$  приемника определяется собственными шумами, что затрудняет непосредственное применение результатов [3] к таким системам.

В настоящей работе представлены результаты анализа лидарного уравнения для лидаров с ЛЧМ интенсивности оптического излучения, рассмотрены возможности повышения энергетических характеристик таких систем, а также возможности применения лазеров с малой когерентностью излучения в когерентных ЛЧМ-лидарам с ЛЧМ оптической несущей.

### 1. Анализ лидарного уравнения для лидаров с ЛЧМ интенсивности зондирующего излучения

Рассмотрим лидарное уравнение для импульсного режима работы [5]:

$$P_{ri}(R) = P_i(c\tau_i/2)\beta(R)A_rR^{-2} \exp\left[-2\int_0^R\alpha(r)dr\right], \quad (1)$$

где  $P_{ri}(R)$  — мгновенное значение принимаемой мощности в момент  $t$ ;  $P_i$  — посылаемая мощность в момент  $t_0$ ;  $c$  — скорость света;  $\tau_i$  — длительность импульса;  $\beta(R)$  — объемный коэффициент рассеяния назад для атмосферы;  $A_r$  — эффективная площадь приемника;  $\alpha(r)$  — объемный коэффициент ослабления.

При этом разрешающая способность по дальности

$$\Delta R = c\tau_i/2. \quad (2)$$

Задав разрешающую способность по дальности непрерывного ЛЧМ-лидара равной  $\Delta R$  (2), что обеспечивается соответствующим выбором девиации частоты [6], получаем лидарное уравнение для непрерывного режима работы:

$$P_{rc}(R) = P_0\Delta R\beta(R)A_rR^{-2} \exp\left[-2\int_0^R\alpha(r)dr\right], \quad (3)$$

где  $P_{rc}(R)$  — мощность принимаемого сигнала от слоя толщиной  $\Delta R$ , удаленного на расстояние  $R$ ;  $P_0$  — мощность непрерывного зондирующего излучения.

Для сравнения требуемой мощности зондирующего излучения непрерывного и импульсного лидаров при прочих равных условиях необходимо учесть, что одним из наиболее эффективных методов приема ЛЧМ-сигналов является применение фотодетектора в режиме радиогетеродинамирования (РРГ) [7], рассмотренного для фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). При этом на модулятор ФЭУ подается ЛЧМ-напряжение, соответствующее закону модуляции зондирующего сигнала [1], а выходной ток ФЭУ содержит компоненты разностной частоты  $f_R$  между частотой опорного напряжения и частотой модуляции принятого излучения [1, 6]. Величина  $f_R$  (дальномерная частота) определяется дальностью до исследуемого участка трассы. РРГ характеризуется коэффициентом преобразования  $K_C$ , составляющим 0,3 для ФЭУ [7]. При этом обнаружительная способность  $D_{RH}$  в РРГ определяется через обнаружительную способность  $D^*$  в режиме прямого фотодетектирования выражением

$$D_{RH}^* = K_C D^*. \quad (4)$$

При ограничении чувствительности внутренними шумами фотодетектора пороговая мощность принимаемого оптического сигнала определяется выражением [4]:

$$P_t = \sqrt{S\Delta F} / D^*, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь фоточувствительной поверхности фотодетектора;  $\Delta F$  – полоса пропускания приемного тракта. Для импульсного режима работы  $\Delta F$  обратно пропорциональна  $\tau_i$  (порядка  $10^{-8}$  с). Для непрерывного лидара  $\Delta F$  обратно пропорциональна времени накопления принимаемого сигнала  $T_S$ , определяемого временем изменения атмосферных условий. При  $\Delta R = 10$  м и скорости ветра 100 м/с  $T_S = 0,1$  с.

Следовательно, с учетом (1), (3), (4) требуемая для достижения пороговых условий мощность зондирующего излучения в непрерывном режиме изменяется обратно пропорционально корню квадратному из времени накопления:

$$P_0 = (P_t / K_C) \sqrt{\tau_i / T_S}. \quad (6)$$

Для характерных режимов работы непрерывных и импульсных лидаров уменьшение требуемой мощности (6) при переходе от импульсного к непрерывному режиму работы составляет  $10^3$ , что позволяет применять маломощные лазеры (единицы милливатт) при длине зондируемой трассы порядка сотен метров [1].

## 2. Анализ работы фоторезистора в режиме радиогетеродинамирования

Как показано выше, применение фотодетектора в РРГ обеспечивает существенное снижение требуемой мощности зондирующего сигнала в лидарах с ЛЧМ интенсивности оптического излучения. Однако данный режим работы исследован лишь для ФЭУ [1,7], что не позволяет в полной мере реализовать преимущества ЛЧМ-лидаров в инфракрас-

ной (ИК) области спектра, представляющей значительный интерес при решении задач анализа состава газовых смесей [6, 8].

Анализ особенностей фотодетекторов показывает, что основным свойством, обеспечивающим возможность осуществления режима радиогетеродинамирования, является резкая зависимость характеристик фотодетектора от приложенного воздействия (напряжения). К таким приборам, способным работать в ИК-области, относятся фоторезисторы [9]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фоторезистора отличается хорошей линейностью и определяется выражением [9]:

$$I_\Phi = Q\Phi U, \quad (7)$$

где  $Q$  – коэффициент пропорциональности, определяемый электрооптическими и геометрическими параметрами фоторезистора;  $\Phi$  – световой поток (мощность падающего излучения);  $U$  – приложенное напряжение.

В режиме прямого фотодетектирования обнаружительная способность фоторезистора равна  $D^*$ , а коэффициент пропорциональности между фототоком и световым потоком  $Q_1$  равен  $QU$ . Для нахождения обнаружительной способности  $D_{RH}^*$  и коэффициента преобразования  $K_C$  фоторезистора в РРГ необходимо определить зависимость амплитуды фототока на разностной частоте  $f_R = |f_H - f_S|$  от амплитуды модулированного светового потока  $\Phi_m$  на частоте сигнала  $f_S$  при питании фоторезистора гетеродинным напряжением с частотой  $f_H$ . Пусть световой поток и гетеродинное напряжение  $u_H$  изменяются по законам

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_0 + \Phi_m \cos(2\pi f_S t + \varphi_S); \\ u_H &= U_0 + U_H \cos(2\pi f_H t + \varphi_H), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Phi_0$  и  $\Phi_m$  – постоянная составляющая и амплитуда модулированного светового потока;  $f_S$  и  $\varphi_S$  – его частота и фаза;  $U_0$  – постоянное смещение;  $U_H$ ,  $f_H$  и  $\varphi_H$  – амплитуда, частота и фаза опорного напряжения. Практический интерес представляет режим приема слабых сигналов, когда реакцией на работу фоторезистора малого выходного напряжения можно пренебречь. Тогда подстановка (8) в (7) (при этом  $U$  заменяется на  $u_H$ ) определяет выражение для фототока разностной частоты, откуда его амплитуда  $I_{fR} = 0,5QU_H\Phi_m$ .

При выборе рабочей точки на середине ВАХ  $U_H$  должна быть вдвое меньше питающего напряжения в режиме прямого фотодетектирования:  $U_H = 0,5U$ . Отсюда  $K_C = 0,25$  и  $D_{RH}^* = 0,25D^*$ . При нулевом смещении  $U_H$  может быть увеличена до  $U$ , работа осуществляется на положительной и отрицательной ветвях ВАХ, а  $K_C$  возрастает до 0,5.

Следует отметить, что применение гетеродинного напряжения большой амплитуды может привести к проявлениям нелинейности ВАХ фоторезистора. Это эквивалентно случаю линейной ВАХ и гетеродинного ЛЧМ напряжения, содержащего высшие гармонические составляющие. Однако анализ, аналогичный рассмотрению прямоугольных

импульсных зондирующих сигналов в ЛЧМ-лидарах [10], показывает, что при гармонической модуляции интенсивности ЛЧМ излучения выходной ток фоторезистора содержит только компоненту разностной частоты  $|f_H - f_S|$ , поскольку компоненты разностной частоты, определяемые гармониками напряжения гетеродина, изменяются во времени и их накопление в резонансной нагрузке не происходит.

Аналогично [10] возможно применение в качестве напряжения гетеродина прямоугольных импульсов (типа «меандр») с линейно изменяющейся частотой повторения. При этом модуляция интенсивности оптического сигнала должна быть гармонической. Тогда амплитуда первой гармоники опорного напряжения в  $4/\pi = 1,27$  раза превышает амплитуду импульсов [10], что позволяет дополнительно повысить коэффициент преобразования  $K_C$  до 0,636 и  $D_{RH}^*$  до  $0,636D^*$ .

Рассмотрим возможность данного режима работы для дистанционного контроля утечек аммиака в цеховых условиях. В предназначенном для этих целей ЛЧМ-лидаре [8] применялся фоторезистор в режиме прямого фотодетектирования, преобразующий ЛЧМ-сигнал обратного рассеяния в электрический сигнал. Далее сигнал поступал на смеситель, к которому также прикладывалось опорное ЛЧМ-напряжение. На выходе смесителя выделялся сигнал разностной частоты. Полоса пропускания фотодетектора соответствовала полосе модулирующих частот  $\Delta F = 10$  МГц, необходимой для обеспечения разрешающей способности  $\Delta R$  в несколько метров.

При использовании фоторезистора (например, на основе InAs), имеющего в спектральном диапазоне  $\lambda = 1,5 \dots 3,0$  мкм  $D^* = 10^{11}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$  $\cdot$ Вт $^{-1}$  и площадь фоточувствительной площадки  $S = 0,25 \times 0,25$  мм $^2$ , пороговая чувствительность приемника [8] составила  $P_t = 8 \cdot 10^{-10}$  Вт. Перевод же фоторезистора в РРГ позволяет уменьшить полосу пропускания до 10 Гц (при времени накопления 0,1 с), что при условиях [8] с учетом (4) и  $K_C = 0,636$  обеспечивает повышение пороговой чувствительности на три порядка, до  $P_t = 1,24 \cdot 10^{-12}$  Вт. Следовательно, применение фоторезистора в РРГ способствует многократному (на несколько порядков) повышению энергетических характеристик лидарных методов измерения с ЛЧМ интенсивности зондирующего излучения в ИК-области спектра. Дополнительное повышение энергетических характеристик возможно за счет использования либо прямоугольных импульсных зондирующих ЛЧМ-сигналов [10], либо прямоугольного импульсного ЛЧМ-напряжения гетеродина.

### 3. Когерентные ЛЧМ-лидары с хранением фазы опорного излучения

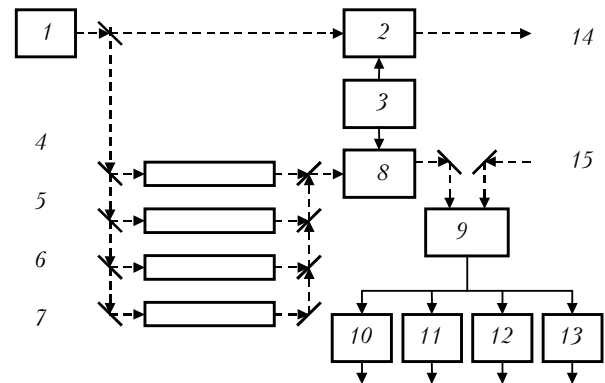
Полностью реализовать достоинства непрерывных методов зондирования, основанных на эквивалентности энергетических характеристик непрерыв-

ных и импульсных систем [3], возможно для когерентных ЛЧМ-лидаров при гетеродинном приеме оптического сигнала [2], обеспечивающем линейный режим детектирования. Принцип действия таких систем основан на применении излучения с большим временем когерентности  $\tau$ . При этом длина когерентности излучения  $l$  должна превышать удвоенную длину зондируемой трассы  $R_{\max}$ :

$$l = c\tau \geq 2R_{\max}, \quad (9)$$

что исключает применение в данных системах перспективных для ИК-области полупроводниковых лазеров (ППЛ) ( $l \sim$  несколько см). Анализ принципов действия когерентных ЛЧМ-лидаров показывает, что основным свойством, обеспечивающим их работоспособность, является сохранение фазы опорного излучения относительно фазы принимаемого оптического сигнала. Поэтому для лазеров с малым  $\tau$  возможно искусственное сохранение фазы опорного излучения относительно фазы принимаемого сигнала за счет применения оптических волокон с малой дисперсией  $\sigma$ .

На рисунке представлена схема ЛЧМ-лидара с хранением фазы опорного излучения.



Функциональная схема когерентного ЛЧМ-лидара с хранением фазы опорного излучения: 1 – оптический квантовый генератор; 2, 8 – оптические модуляторы; 3 – генератор ЛЧМ-напряжения; 4–7 – линии задержки опорного излучения на основе оптического волокна; 9 – фотоприемник в режиме фотосмешения; 10–13 – фильтры разностных (дальномерных) частот; 14 – зондирующее излучение; 15 – сигнал обратного рассеяния; ---> оптический сигнал; —> электрический сигнал

Здесь часть излучения лазера (зондирующий сигнал) подвергается ЛЧМ и направляется в атмосферу. Вторая часть (опорное излучение) делится между  $m$  каналами хранения (оптическими волокнами). Длина  $m$ -го волокна соответствует расстоянию  $R_m$  до зондируемого участка трассы для данного канала. С выхода волокон излучение подается на общий модулятор, где подвергается ЛЧМ по тому же закону, что и зондирующий сигнал. Далее опорное излучение смешивается с принятым оптическим сигналом в фотоприемнике. При этом обеспечивается взаимная когерентность опорного излучения  $m$ -го канала и принимаемого сигнала, соответствующего дальности  $R_m$ .

Рассмотрение принципов работы ЛЧМ-лидара (рисунок) показывает, что когерентный прием возможен в каждом канале от слоя атмосферы толщиной  $l/2$ .

Следовательно, при  $l \leq 2\Delta R$  взаимное влияние каналов приема отсутствует, что выполняется для представляющих практический интерес приложений данного метода, например, при использовании ППЛ ( $\tau = 250$  пс,  $l = 7,5$  см) и  $\Delta R$  в несколько метров. Тогда опорное и принимаемое излучения соседних каналов взаимно некогерентны, ширина спектра сигнала разностной частоты на выходе фотодетектора многократно превышает полосу пропускания выходных узкополосных фильтров, что исключает накопление сигнала помех от соседних каналов.

Для оценки предельных характеристик лидара с хранением фазы опорного излучения необходимо учесть влияние параметров световода на когерентность распространяющегося в нем излучения. Разброс времени  $\Delta t$  появления компонентов оптического сигнала на выходе световода длиной  $l_C$  и дисперсией  $\sigma$  равен  $l_C\sigma$ , т.е. на выходе световода присутствуют компоненты входного излучения, поступившие на вход в интервале  $\Delta t$ .

При  $\Delta t \leq \tau = l/c$  случайный набег фазы опорного излучения относительно фазы принимаемого сигнала не превышает  $180^\circ$ , т.е. их взаимная когерентность сохраняется, что позволяет принять данное выражение в качестве условия когерентного режима работы лидара с хранением фазы опорного излучения. Поскольку  $R$  определяется длиной волокна с показателем преломления сердцевины  $n$  выражением  $R = nl_C/2$ , с учетом максимальной  $l_C$ , при которой  $\Delta t \leq \tau = l/c$ , находим дальность действия  $R_{C\max} \leq nl/(2c\sigma)$ .

Сопоставление  $R_{C\max}$  и (9) показывает, что увеличение длины зондируемой трассы определяется только параметрами световода и составляет  $\gamma = n(c\sigma)^{-1}$ . При  $\sigma = 10$  пс/км [11] и  $n = 1,5$  величина  $\gamma = 5 \cdot 10^5$ . Для одночастотного ППЛ ( $l = 7,5$  см)  $R_{C\max} = 18,7$  км, что соответствует возможностям известных ранее лидаров с высококогерентными газовыми лазерами.

Взаимная независимость работы каналов приема позволяет применить неравномерное деление мощности опорного излучения между каналами хранения с целью повышения метрологических характеристик системы. Поскольку выходной ток фотосмесителя определяется величиной  $2\sqrt{P_S P_H}$  (где  $P_S$  — мощность сигнала;  $P_H$  — мощность опорного излучения) [4], выбор коэффициента деления по закону  $g_m \sim 1/m^2$  позволяет уменьшить динамический диапазон выходных сигналов фотодетектора в  $(R_{C\max}/R_{\min})^2$  раз (где  $R_{\min}$  — минимальная дальность) и компенсировать убывание выходных сигналов по закону  $R^{-2}$ , представленному в (1). Соответственно, мощность опорного излучения  $m$ -го канала  $P_{Hm} = \theta P_H m^2$  (где  $\theta$  — постоянный коэффициент). В идеальном случае

$$\sum_{m=1}^M P_{Hm} = P_H,$$

$$\theta = 1 / \sum_{m=1}^M m^2 = 1 / \left[ \frac{1}{3}(M+1)^3 - \frac{1}{2}(M+1)^2 + \frac{1}{6}M + \frac{1}{6} \right].$$

Откуда следует трехкратное повышение энергетических характеристик при неравномерном делении мощности опорного излучения между каналами хранения по сравнению с режимом работы при равномерном делении мощности между каналами хранения:

$$P_{HM} = P_H M^2 / \left[ \frac{1}{3}(M+1)^3 - \frac{1}{2}(M+1)^2 + \frac{1}{6}M + \frac{1}{6} \right].$$

При  $M = 100$  находим  $P_{HM} = 0,0296 P_H$  вместо  $0,01 P_H$  для режима с равномерным делением мощности.

## Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение фоторезисторов в режиме радиогетеродинамирования, за счет уменьшения полосы выходного сигнала разностной (дальномерной) частоты, обеспечивает многократное (на несколько порядков) уменьшение пороговой мощности принимаемых сигналов и соответствующее повышение энергетических характеристик лидаров с ЛЧМ интенсивности зондирующего излучения, работающих в ИК-области спектра.

2. Применение устройств хранения фазы опорного излучения в когерентных ЛЧМ-лидарах обеспечивает многократное (до пяти порядков) увеличение длины зондируемой трассы при сохранении взаимной когерентности опорного и принимаемого излучений, позволяя использовать полупроводниковые лазеры в таких системах с дальностью действия до 10 км. Неравномерное деление мощности опорного излучения между каналами хранения способствует повышению метрологических характеристик системы за счет существенного уменьшения (в  $(R_{\max}/R_{\min})^2$  раз) динамического диапазона выходных сигналов фотоприемника.

1. Агшиев Р.Р., Айбатов Л.Р., Иванов А.Н., Ильин Г.И., Польский Ю.Е. Лидар с линейной частотной модуляцией. Основные требования и характеристики // IX Всес. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез. докл. Ч. 2. Томск, 1987. С. 239–242.
2. Гордов Е.П., Хмельницкий Г.С. Многоцелевой автономный лидар на CO<sub>2</sub>-лазере // 1 Межресп. симпоз. «Оптика атмосферы и океана» (Томск, 1994): Тез. докл. Ч. 2. Томск: ТНЦ СО РАН, 1994. С. 44–45.
3. Виницкий А.С. Очерк основ радиолокации при непрерывном излучении радиоволн. М.: Сов. радио, 1961. 496 с.
4. Шереметьев А.Г., Толпарев Р.Г. Лазерная связь. М.: Связь, 1974. 384 с.

5. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
6. *Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Польский Ю.Е.* Непрерывный ИК-лидар для дистанционного контроля утечек природного газа // *Оптика атмосфер. и океана*. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1624–1629.
7. *Петрухин Г.Д.* Фотоэлектронные умножители в режиме радиогетеродинамирования. М.: Радио и связь, 1983. 88 с.
8. *Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Власов В.А., Сагдиев Р.К.* Дистанционное бесконтактное обнаружение утечек аммиака в цеховых условиях // *Оптика атмосфер. и океана*. 1999. Т. 12. № 1. С. 70–74.
9. *Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М.* Введение в оптоэлектронику. М.: Высш. шк., 1991. 191 с.
10. *Айбатов Л.Р.* Применение прямоугольных импульсных зондирующих сигналов в непрерывных ЛЧМ-лидарах // *Оптика атмосфер. и океана*. 2002. Т. 15. № 7. С. 631–634.
11. *Кухаркин Е.С.* Электрофизика информационных систем. М.: Высш. шк., 2001. 671 с.

***L.R. Aibatov. Analysis of energy characteristics increase possibility for LFM-CW-lidars.***

Analysis of lidar equation was made for CW-lidars with linear frequency modulation (LFM) of sounding beam intensity. Analysis of photo-resistor operation under radio-heterodyning regime (RHR) was conducted. It was shown that RHR provides for multiple reduction (about  $10^3$  times) of threshold power for received signals and corresponding increase of energy characteristics for CW-lidars with LFM of beam intensity at infra-red spectrum band. Operation principles of coherent LFM-lidar with phase conservation of support beam were considered. It was shown that artificial phase conservation (using optical fibers) provides for multiple lengthening (about  $10^5$  times) sounded path for which mutual coherence for support and received beams is conserved permitting laser diodes application in these systems up to 10 kilometers.