

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПРЕРЫВНЫХ ЛИДАРОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПОДНЕСУЩЕЙ

© 2007 г. Л. Р. Айбатов, канд. техн. наук

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань

Представлены результаты анализа лидарного уравнения для лидаров с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) поднесущей. Проведен 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 поднесущей в ИК диапазоне.

Коды OCIS: 010.3640.

Поступила в редакцию 20.12.2005.

Непрерывные лидары с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) поднесущей (при этом обеспечивается ЛЧМ интенсивности зондирующего излучения) дают возможность обнаружения различных примесей с пространственным разрешением при малой мощности зондирующего сигнала [1, 2]. Принцип действия данных лидаров базируется на обоснованной в [3] эквивалентности энергетических характеристик радиолокационных систем, работающих в режиме коротких зондирующих импульсов большой мощности, и систем, работающих в режиме ЛЧМ непрерывного зондирующего излучения малой мощности при большом времени накопления принимаемого сигнала. Анализ [3] выполнен для линейного режима детектирования принимаемого сигнала и непосредственно применим к когерентным ЛЧМ-лидарам с когерентным приемом оптического излучения [4]. В таких системах фотосмеситель работает в линейном режиме, а собственными шумами фотодетектора по сравнению с внешними (фоновыми) шумами можно пренебречь [5]. 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, 2], обладающих большей простотой технической реализации, фотоприемник работает в режиме прямого фотодетектирования, который отличается квадратичностью (относительно напряженности электрического поля световой волны) характеристик [5, 6]. При этом обнаружительная способность D^* приемника определяется собственными шумами фотодетектора, что затрудняет непосредственное применение результатов анализа [3] к лидарам с ЛЧМ поднесущей.

В настоящей работе представлены результаты анализа лидарного уравнения для непрерывных лидаров с ЛЧМ поднесущей, а также рассмотрены возможности повышения энергетических характеристик таких систем.

Рассмотрим лидарное уравнение для импульсного режима работы [7]:

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

где $P_{ri}(R)$ – мгновенное значение принимаемой мощности в момент t , R – расстояние до исследуемого участка трассы, P_i – посылаемая мощность в момент t_0 , c – скорость света, τ_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 согласно (2), что обеспечивается соответствующим выбором девиации частоты [2], 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 ΔR , удаленного на расстояние R ; P_0 – мощность непрерывного зондирующего излучения.

Для сравнения требуемой мощности зондирующего излучения непрерывного и импульсного лидаров при прочих равных условиях (ΔR , дальности действия R_{\max}) и использовании одинаковых фотодетекторов с обнаружительной способностью D^* необходимо учесть, что одним из наиболее эффективных методов приема ЛЧМ-сигналов является применение фотодетектора в режиме радиогетеродинамирования, рассмотренного в [8] 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, 7]. Величина f_R (дальномерная частота) определяется дальностью до исследуемого участка трассы. Режим радиогетеродинамирования характеризуется коэффициентом преобразования K_C , который для ФЭУ равен 0,3 [8]. При этом обнаружительная способность D_{RH}^* в режиме радиогетеродинамирования 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 [5, 6]

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

где S – площадь фоточувствительной поверхности фотодетектора, ΔF – полоса пропускания приемного тракта. Для импульсного режима работы значение ΔF обратно пропорционально длительности зондирующего импульса τ_i (порядка 10^{-8} с при использовании лазера в режиме с модуляцией добротности). Для непрерывного лидара значение ΔF обратно пропорционально 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:

$$P_0 = (P_i / K_C) \sqrt{\tau_i / T_S}, \quad (6)$$

хотя энергия зондирующего излучения, равная произведению мощности на время, увеличивается пропорционально корню квадратному из времени накопления:

$$P_0 T_S = (P_i \tau_i / K_C) \sqrt{T_S / \tau_i}. \quad (7)$$

Для характерных режимов работы непрерывных и импульсных лидаров уменьшение требуемой мощности (6) при переходе от импульсного к непрерывному режиму работы составляет 10^3 , что обосновывает экспериментально установленную в [1] возможность применения в лидарных измерениях маломощных (единицы милливатт) лазеров при длине зондируемой трассы порядка сотен метров.

Следовательно, применение фотодетектора в режиме радиогетеродинамирования обеспечивает су-

щественное снижение требуемой мощности зондирующего сигнала в лидарах с ЛЧМ поднесущей. Однако данный режим работы исследован лишь для ФЭУ [1, 8], что не позволяет в полной мере реализовать преимущества ЛЧМ-лидаров в инфракрасной (ИК) области спектра, представляющей значительный интерес при решении задач анализа состава газовых смесей [2, 9].

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 [10]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фоторезистора отличается хорошей линейностью и определяется выражением [10]

$$I_\Phi = q \eta \tau_E \mu (h \nu b^2) \Phi U = Q \Phi U, \quad (8)$$

где I_Φ – фототок, q – заряд электрона, η – квантовый выход внутреннего фотоэффекта, τ_E – время жизни фотоэлектронов, h – постоянная Планка, ν – частота излучения фотонов, b – длина чувствительной площадки фоторезистора, Φ – световой поток (мощность падающего излучения), U – приложенное напряжение, Q – коэффициент пропорциональности.

В режиме прямого фотодетектирования обнаружительная способность фоторезистора равна D^* , а коэффициент пропорциональности между фототоком и световым потоком

$$Q_1 = Q U. \quad (9)$$

Для нахождения обнаружительной способности D_{RH}^* и коэффициента преобразования K_C фоторезистора в режиме радиогетеродинамирования необходимо определить зависимость амплитуды фототока на разностной частоте $f_R = |f_H - f_S|$ от амплитуды модулированного светового потока Φ_m на частоте сигнала f_S при питании фоторезистора гетеродинным напряжением с частотой f_H . Пусть световой поток изменяется по закону

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_m \cos(2\pi f_S t + \varphi_S), \quad (10)$$

где Φ_0 и Φ_m – постоянная составляющая и амплитуда модулированного светового потока, f_S и φ_S – его частота и фаза, а приложенное гетеродинное напряжение

$$u_H = U_0 + U_H \cos(2\pi f_H t + \varphi_H), \quad (11)$$

где U_0 – постоянное смещение, U_H , f_H и φ_H – амплитуда, частота и фаза опорного напряжения.

Наибольший практический интерес представляет режим приема слабых сигналов, когда реакцией на работу фоторезистора малого выходного напря-

жения разностной частоты на резонансной нагрузке можно пренебречь. Тогда подстановка (10), (11) в (8) (при этом U заменяется на u_H) определяет выражение для фототока разностной частоты:

$$i_{FR} = 0,5Q\Phi_m U_H \cos(2\pi|f_H - f_S|t + \varphi_H - \varphi_S), \quad (12)$$

откуда амплитуда фототока разностной частоты

$$I_{FR} = 0,5QU_H\Phi_m. \quad (13)$$

При выборе рабочей точки на середине ВАХ амплитуда напряжения гетеродина должна быть вдвое меньше питающего напряжения в режиме прямого фотодетектирования: $U_H = 0,5U$. Тогда из сопоставления (13) и (8) следует, что $K_C = 0,25$ и $D_{RH}^* = 0,25D^*$. При нулевом смещении амплитуда 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 (хотя и незначительной) ВАХ фоторезистора. Это эквивалентно случаю идеальной линейной ВАХ и гетеродинного ЛЧМ-напряжения, содержащего высшие гармонические составляющие. Однако анализ, аналогичный рассмотрению прямоугольных импульсных зондирующих сигналов в ЛЧМ-лидарах [11], показывает, что при гармонической модуляции интенсивности ЛЧМ-излучения выходной ток фоторезистора содержит только компонент разностной (дальномерной) частоты $|f_H - f_S|$ (12), поскольку частоты комбинационных составляющих, определяемых гармониками напряжения гетеродина, изменяются во времени и их накопления в резонансной нагрузке не происходит. Аналогично [11] 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 $4/\pi = 1,27$ раз превышает амплитуду импульсов [12], что позволяет дополнительно повысить коэффициент преобразования K_C до 0,636 и обнаружительную способность в режиме радиогетеродинирования до $0,636D^*$.

Рассмотрим возможности данного режима работы для дистанционного контроля утечек аммиака в цеховых условиях. В предназначенном для этих целей ЛЧМ-лидаре [9] применялся фоторезистор в режиме прямого фотодетектирования, преобразующий ЛЧМ-сигнал обратного рассеяния в электрический ЛЧМ-сигнал. Далее электрический сигнал поступал на смеситель, к которому также прикладывалось опорное ЛЧМ-напряжение. На выходе

смесителя выделялся сигнал разностной (дальномерной) частоты. Полоса пропускания фотодетектора соответствовала полосе модулирующих частот $\Delta F = 10$ МГц, необходимой для обеспечения разрешающей способности ΔR в несколько метров. При использовании фоторезистора (например, на основе InAs), имеющего в спектральном диапазоне $\lambda = 1,5-3,0$ мкм $D = 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹ и площадь фоточувствительной площадки $S = 0,25 \times 0,25$ мм², пороговая чувствительность приемника [9] составила $P_t = 8 \times 10^{-10}$ Вт. Перевод фоторезистора в режим радиогетеродинирования позволяет уменьшить полосу пропускания до 10 Гц (при времени накопления 0,1 с), что при условиях [9] с учетом (4) и $K_C = 0,636$ обеспечивает повышение пороговой чувствительности на три порядка до $P_t = 1,24 \times 10^{-12}$ Вт. Следовательно, применение фоторезистора в режиме радиогетеродинирования способствует многократному (на несколько порядков) повышению энергетических характеристик лидарных методов измерения с ЛЧМ поднесущей в ИК области спектра. Дополнительное повышение энергетических характеристик возможно за счет использования либо прямоугольных импульсных зондирующих ЛЧМ-сигналов [11], либо прямоугольного импульсного ЛЧМ-напряжения гетеродина.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ лидарного уравнения для непрерывных лидаров с ЛЧМ поднесущей. С учетом квадратичности характеристик фотодетекторов показано, что необходимая мощность зондирующего излучения уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из времени накопления принимаемого сигнала, что обосновывает экспериментально установленную возможность применения в лидарных измерениях маломощных (единицы милливатт) лазеров при длине трассы порядка сотен метров.

2. Выполнен анализ работы фоторезисторов в режиме радиогетеродинирования. Показано, что за счет уменьшения полосы выходного сигнала разностной (дальномерной) частоты данный режим обеспечивает многократное (на несколько порядков) уменьшение пороговой мощности принимаемых сигналов и соответствующее повышение энергетических характеристик лидаров с ЛЧМ поднесущей, работающих в ИК области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Иванов А.Н., Ильин Г.И., Польский Ю.Е. Лидар с линейной частотной модуляцией. Основные требования и характеристики // Тез. докл. IX Всесоюз. симп. по лазерному и акустическо-

- му зондированию атмосферы. Томск, 1987. Ч. 2. С. 239–242.
2. *Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Польский Ю.Е.* Непрерывный ИК-лидар для дистанционного контроля утечек природного газа // *Оптика атмосферы и океана*. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1624–1629.
 3. *Виницкий А.С.* Очерк основ радиолокации при непрерывном излучении радиоволн. М.: Сов. радио, 1961. 496 с.
 4. *Гордов Е.П., Хмельницкий Г.С.* Многоцелевой автодин-ный лидар на CO₂-лазере // Тез. докл. I Межресп. симп. “Оптика атмосферы и океана”. Томск, 1994. Ч. 2. С. 44–45.
 5. *Росс М.* Лазерные приемники. М.: Мир, 1969. 520 с.
 6. *Шереметьев А.Г., Толпарев Р.Г.* Лазерная связь. М.: Связь, 1974. 384 с.
 7. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Хинкли Э.Д. М.: Мир, 1979. 416 с.
 8. *Петрухин Г.Д.* Фотоэлектронные умножители в режиме радиогетеродинамирования. М.: Радио и связь, 1983. 88 с.
 9. *Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Власов В.А., Сагдиев Р.К.* Дистанционное бесконтактное обнаружение утечек аммиака в цеховых условиях // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12. № 1. С. 70–74.
 10. *Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М.* Введение в оптоэлектронику. М.: Высш. школа, 1991. 191 с.
 11. *Айбатов Л.Р.* Применение прямоугольных импульсных зондирующих сигналов в непрерывных ЛЧМ-лидарах // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. Т. 15. № 7. С. 631–634.
 12. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971. 672 с.