

Л.Р. Айбатов

Применение прямоугольных импульсных зондирующих сигналов в непрерывных ЛЧМ-лидарах

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию 17.09.2001 г.

Представлены результаты анализа работы непрерывных лидаров, в которых модуляция интенсивности зондирующего оптического излучения производится симметричными прямоугольными импульсными сигналами (типа «меандр») с линейным законом изменения частоты повторения. Особенностью рассмотренного способа зондирования атмосферы является сочетание в нем свойств как непрерывных, так и импульсных лидарных методов, что может обеспечить одновременную реализацию достоинств каждого из них на практике.

Непрерывные лидары с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) интенсивности оптического излучения обеспечивают возможность обнаружения различных примесей с пространственным разрешением при малой мощности зондирующего излучения [1].

В работах [1, 2] выполнен анализ принципа действия непрерывных ЛЧМ-лидаров с синусоидальным законом изменения интенсивности оптического излучения. Однако практическая реализация такого закона модуляции излучения с малым уровнем нелинейных искажений представляет собой достаточно сложную техническую задачу как при использовании внешних оптических модуляторов [1], так и при внутренней модуляции излучения ОКГ, в частности применительно к перспективным в этих системах полупроводниковым инжекционным лазерам [3], характеризующимся существенно нелинейной зависимостью выходной мощности от тока накачки.

В наших экспериментах использовался непрерывный ЛЧМ-лидар, в котором модуляция интенсивности зондирующего оптического излучения производится симметричными прямоугольными импульсными сигналами (типа «меандр») с линейным законом изменения частоты повторения. При этом принимаемый оптический сигнал преобразуется фотоприемником в электрический и подается на вход смесителя частоты. В качестве опорного напряжения используется синусоидальный сигнал с таким же законом модуляции, что и закон изменения частоты повторения зондирующих оптических импульсов.

Пусть закон изменения частоты повторения лазерных зондирующих импульсов описывается следующим соотношением:

$$f_0(t) = at, \quad a = \text{const}, \quad (1)$$

где t – время.

В качестве опорного напряжения для смесителя используется синусоидальный ЛЧМ-сигнал с таким же законом частотной модуляции, что и закон изме-

нения частоты повторения зондирующих оптических сигналов $f_0(t)$. В соответствии с разложением последовательности прямоугольных импульсов в ряд Фурье [4] спектр принимаемого сигнала содержит компоненты с частотами

$$(2n - 1) f_0(t - \tau) = (2n - 1) a(t - \tau), \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – натуральное число; τ – удвоенное время, необходимое для прохождения светом зондируемой трассы.

В этом случае сигнал биений на выходе смесителя содержит компоненты с частотами

$$f_{R1} = a\tau, \quad (3)$$

$$f_{R2} = \text{abs}(3a\tau - 2at), \quad (4)$$

.....

$$f_{Rn} = \text{abs}[(2n - 1) a \tau - 2(n - 1) at]. \quad (5)$$

Частота первой компоненты f_{R1} не зависит от времени и определяется расстоянием до исследуемого атмосферного слоя. Остальные частотные компоненты не оказывают влияния на работу лидара, поскольку их частоты непрерывно изменяются во времени и накопление этих компонент в приемном модуле не происходит.

Таким образом, сигналы разностной (дальномерной) частоты на выходе смесителя содержат постоянные во времени компоненты только для первой гармоники зондирующего оптического импульсного сигнала. Аналогично [1 – 3] частоты сигналов на выходе смесителя пропорциональны удвоенному времени распространения зондирующего излучения до исследуемых участков трассы, что обеспечивает соответствующее пространственное разрешение и при использовании оптических импульсов прямоугольной формы.

Иная ситуация возникает, когда подаваемый на смеситель опорный сигнал не является идеально

синусоидальным и его спектр также содержит компоненты с частотами

$$f_n = (2n - 1) at. \quad (6)$$

Тогда в спектре сигнала разностной частоты на выходе смесителя кроме f_{R1} (3) появляются составляющие высших гармоник, частоты которых f_{Rm} также постоянны во времени:

$$f_{Rm} = (2m - 1) a\tau = \text{const}, \quad (7)$$

где $m = 2, 3, 4$ – натуральное число.

Эти гармонические составляющие могут вызывать помехи в соседних каналах приема. Однако данный вид помех присущ и рассмотренным ранее [1–3] непрерывным ЛЧМ-лидарам при неидеальности синусоидального опорного сигнала, подаваемого на смеситель фотоприемного устройства, и неидеальности синусоидального закона изменения интенсивности оптического зондирующего излучения.

Таким образом, принцип действия ЛЧМ-лидаров с зондирующими сигналами прямоугольной формы эквивалентен принципу действия представленных выше [1–3] ЛЧМ-лидаров.

Для экспериментальной проверки работы ЛЧМ-лидара с зондирующими сигналами прямоугольной формы была использована установка, аналогичная [1], источником излучения в которой служил гелий-неоновый ОКГ с мощностью излучения в непрерывном режиме менее 1 мВт на длине волны 0,63 мкм. При этом линейно изменяющееся по частоте синусоидальное напряжение от генератора качающейся частоты через широкополосные усилители подавалось на электрооптический модулятор типа МЛ-5 и на фотоприемное устройство (ФПУ).

Излучение ОКГ поступало на электрооптический модулятор и направлялось в атмосферу. Рассеянный при прохождении зондируемой трассы сигнал поступал на оптический вход ФПУ через приемную оптику (объектив МТО-1000А) и систему светофильтров. Усиленный ФПУ сигнал разностной частоты f_R , соответствующей заданной дальности R до исследуемого участка трассы, выделялся перестраиваемым узкополосным фильтром и подавался на регистрирующее устройство. При этом [1]:

$$f_R = 2R \Delta F F_M / c, \quad (8)$$

где ΔF – девиация частоты; F_M – частота модуляции; c – скорость света.

В качестве ФПУ использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84, работающий в режиме радиогетеродинамирования [5]. Для этого опорное ЛЧМ-напряжение с выхода второго широкополосного усилителя подавалось на модулятор ФЭУ.

Параметры управляющих напряжений и характеристики фотоприемного устройства соответствовали [1] и составляли: девиация частоты $\Delta F = 10$ МГц, частота модуляции $F_M = 50$ Гц; коэффициент преобразования ФЭУ-84 в режиме радиогетеродинамирования 0,3; динамический диапазон ФПУ более 200.

Модуляционная характеристика электрооптического модулятора существенно нелинейна [6]:

$$I/I_0 = \sin^2 [(U/U_{\lambda/2}) \pi/2], \quad (9)$$

где I_0 – интенсивность подаваемого на модулятор излучения; I – интенсивность излучения на выходе модулятора; U – прикладываемое к модулятору напряжение; $U_{\lambda/2}$ – полуволновое напряжение модулятора.

У используемого в экспериментах модулятора МЛ-5 полуволновое напряжение составляло 180 В, и для получения режима работы излучателя в линейном режиме с гармоническими ЛЧМ-зондирующими сигналами [1] рабочая точка задавалась постоянным смещением 90 В, а амплитуда синусоидального ЛЧМ-напряжения, подаваемого на модулятор, составляла 30 В. При этом глубина модуляции интенсивности зондирующего излучения не превышала 0,5.

Следует отметить, что необходимость работы с гармоническими зондирующими сигналами в режиме с внешней модуляцией излучения ОКГ [1] ограничивает коэффициент использования мощности лазера на уровне 0,25. В данных условиях установка обеспечивала регистрацию сигаретного дыма на расстоянии более 50 м при отношении сигнал-шум на выходе фильтра не менее 3 [1].

Осуществление режима работы с прямоугольными импульсными зондирующими сигналами в ЛЧМ-лидаре производилось следующим образом. Выходные каскады широкополосного усилителя, питающего модулятор, вводились в режим ограничения за счет увеличения амплитуды входного ЛЧМ-сигнала, а амплитуда выходного напряжения поддерживалась на уровне, соответствующем линейному режиму работы [1] (30 В) за счет регулировки напряжения питания усилителя. При этом на модулятор подавались ограниченные по амплитуде сигналы, что соответствовало режиму работы лидара с негармоническими ЛЧМ-зондирующими сигналами. Дальнейшее увеличение амплитуды входного сигнала обеспечивало перевод выходных каскадов усилителя в ключевой режим и формирование импульсов напряжения прямоугольной формы типа «меандр» на электрооптическом модуляторе, позволяя перейти в режим прямоугольных импульсных зондирующих сигналов в ЛЧМ-лидаре.

Исследование новых режимов работы производилось следующим образом. В пределах зондируемой трассы устанавливался диффузно отражающий экран и регистрировался рассеянный им сигнал на дальномерной частоте f_R (8) высокой интенсивности (соотношение сигнал-шум составляло 200). Одновременное измерение сигналов на частотах, кратных f_R (kf_R , $k = 2, 3, \dots$), показало, что уровень составляющих на этих частотах [в том числе, (7)], обусловленных несинусоидальной формой зондирующих сигналов, не превышал уровня шумов для режима как с негармоническими, так и с прямоугольными импульсными зондирующими сигналами. В то же время при увеличении сигнала на входе широкополосного усилителя регистрировался рост сигнала в фотоприемном устройстве на дальномерной частоте f_R .

Увеличение амплитуды выходного сигнала на частоте f_R носило монотонный характер и достигало 1,25...1,27 при переходе от режима работы с гармоническими сигналами к режиму работы с прямоугольными импульсными зондирующими сигналами. Соответствующее увеличение принятого сигнала обеспечивалось также и при регистрации дыма, а дальность действия лидара в режиме работы с прямоугольными ЛЧМ-сигналами возрастала на 12%.

Для анализа полученных результатов необходимо принять во внимание, что в общем случае работы ЛЧМ-лидара с негармоническими зондирующими сигналами спектр принимаемого сигнала содержит компоненты с частотами

$$p f_0(t - \tau) = pa(t - \tau), \quad (10)$$

где $p = 1, 2, 3, \dots$ – натуральное число. В этом случае сигнал биений на выходе смесителя содержит компоненты с частотами

$$f_{R1} = a\tau, \quad (11)$$

$$f_{R2} = \text{abs}(2a\tau - a\tau), \quad (12)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$f_{Rp} = \text{abs}[pa\tau - (p - 1)a\tau]. \quad (13)$$

Аналогично (3) частота первой компоненты f_{R1} постоянна и определяется расстоянием до исследуемого атмосферного слоя, а накопление остальных компонент в приемном модуле не происходит, и они не оказывают влияния на работу лидара. Если же подаваемый на смеситель опорный сигнал не является идеально синусоидальным и его спектр содержит компоненты с частотами $f_n = qat$, то в спектре сигнала разностной частоты, аналогично (7), появляются составляющие высших гармоник с постоянными во времени частотами

$$f_{Rq} = qat = \text{const}, \quad q = 2, 3, 4, \dots, \quad (14)$$

которые могут вызвать помехи в других каналах приема и при работе в режиме с негармоническими зондирующими сигналами.

Оценим влияние неидеальности опорного напряжения на работу ЛЧМ-лидара с негармоническими зондирующими сигналами. Уровень высших гармоник опорного напряжения определяется коэффициентом гармоник (коэффициентом нелинейных искажений) [7]:

$$K_\Gamma = (U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots)^{1/2} / U_{m1}, \quad (15)$$

где U_{m1} – амплитуда напряжения основной частоты; U_{m2}, U_{m3}, \dots – амплитуды высших гармоник. Следовательно, вклад каждой из составляющих высших гармоник не превышает величины K_Γ . В соответствии с лидарным уравнением [8] влияние помех (14) возрастает с увеличением номера q . Поскольку для опорного напряжения, близкого по форме к синусоидальному, наиболее интенсивны гармонические составляющие с номером не более 5, рассмотрим край-

ний случай, когда вся нелинейность опорного сигнала обусловлена 5-й гармоникой:

$$U_{m5} / U_{m1} = K_\Gamma \quad (16)$$

для режима работы с прямоугольными импульсными зондирующими сигналами, наиболее подверженному воздействию такого рода помех. В предположении однородности зондируемой трассы и слабого поглощения в атмосфере, уровень полезного сигнала уменьшается по закону $1/R^2$ [8]. Амплитуда 5-й гармоники в спектре импульсного сигнала типа «меандр» составляет 0,2 от амплитуды первой гармоники [4]. Соответственно, уровень помех на дальномерной частоте $f_{R5} = 5f_{R1}$ (14), создаваемых при обработке сигнала дальномерной частоты f_{R1} (3), (11), составляет

$$K_{п5} = U_n(f_{R5}) / U_c(f_{R5}) = 5K_\Gamma, \quad (17)$$

где $U_n(f_{R5})$ и $U_c(f_{R5})$ – величины напряжений помехи и полезного сигнала соответственно.

С учетом достаточной простоты формирования относительно маломощных опорных сигналов с $K_\Gamma = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ уровень помех, присущих режиму работы с негармоническими или прямоугольными импульсными ЛЧМ-сигналами, может быть сведен до величины в десятые доли процента, что согласуется с полученными экспериментальными данными. Интересно заметить, что наблюдаемый в экспериментах монотонный рост полезного сигнала при переходе от режима работы с гармоническими зондирующими сигналами к режимам с негармоническими и далее – с прямоугольными импульсными сигналами соответствует увеличению амплитуды первой гармоники в их спектре, достигающему величины 1,27 для сигналов типа «меандр» [4].

Результаты выполненного анализа показывают, что обработка принимаемого излучения в рассматриваемых схемах лидаров производится по первой гармонике сигнала разностной частоты, что позволяет применить для их описания элементы теории непрерывных лидаров, представленные в работе [2], касающиеся выбора таких параметров, как девиация частоты, частота модуляции, и определения разрешающей способности. Одновременно переход в режимы с негармоническими и далее – с прямоугольными импульсными зондирующими сигналами позволяет увеличить глубину модуляции интенсивности излучения ОКГ до 100% (вместо 50% [1,2]), что соответствует повышению преобразования мощности лазера в мощность зондирующего сигнала с 25 до 50% и до 63% для обсуждаемых режимов. Соответственно, дальность действия непрерывных ЛЧМ-лидаров при переходе в эти режимы может быть увеличена в 1,4 и 1,6 раза.

Таким образом, режиму работы с прямоугольными импульсными зондирующими ЛЧМ-сигналами присущи основные свойства непрерывных лидаров [1 – 3] – накопление сигнала дальномерной частоты в приемном тракте, малый уровень мощности непрерывного зондирующего излучения, необходимой для обеспечения

приемлемой для практического применения дальности действия, пространственное разрешение. С другой стороны, применение импульсных зондирующих сигналов прямоугольной формы в непрерывных ЛЧМ-лидарах позволяет исключить влияние нелинейности характеристик оптических модуляторов (и лазерных излучателей в режиме с внутренней модуляцией [3]) на параметры всей системы и упрощает работу подмодуляторов за счет перевода активных элементов в ключевой режим. Следовательно, обсуждаемый режим работы проявляет и некоторые особенности импульсных методов зондирования.

В данном случае в качестве подмодулятора перспективно использование формирователей импульсов [9], специально разработанных для управления электрооптическими модуляторами, а также пьезоэлектрическими излучателями ультразвука, применяющимися в технике акустического зондирования различных сред.

Устройство [9] выполнено на лавинных транзисторах, отличается простотой технической реализации, высокой надежностью и обеспечивает формирование прямоугольных импульсов напряжения большой амплитуды (100 В) с короткими фронтами (единицы нс) на большой емкостной нагрузке (десятки пФ). Длительность и частота следования формируемых импульсов определяются длительностью и частотой следования входных управляющих импульсов с амплитудой в единицы вольт.

В зависимости от типа излучателя обсуждаемый метод зондирования может быть применен: 1) при обнаружении различных атмосферных примесей, в частности для дистанционного контроля утечек природного газа [2], 2) при использовании в качестве излучателей гелий-неоновых лазеров, генерирующих в спектральной области 3,39 мкм, 3) для бесконтактного обнаружения утечек аммиака в цеховых условиях [3] с применением в качестве излучателя инжекционных полупроводниковых лазеров на основе соединений InGaAsP/InP, работающих в режиме с внутренней модуляцией в спектральной области 1,5 мкм.

L.R. Aibatov. The use of rectangular pulsed sensing signals in LFM-CW lidars.

The results of CW lidars operation analysis are presented for the case of sounding emission intensity modulation by symmetrical pulsed signals with a linear law of repetition rate change. The described sensing method naturally combines CW lidars features and pulsed lidar peculiarities, and it can provide simultaneous realization in practice the advantages of the both mentioned systems.

Таким образом, результаты выполненного анализа показывают, что достаточно простые технические решения обеспечивают возможность разработки недорогих приборов для дистанционного контроля параметров атмосферы, обладающих приемлемыми для практических применений характеристиками, в том числе пространственной разрешающей способностью.

Особенностью рассмотренного способа зондирования атмосферы является сочетание в нем свойств как непрерывных, так и импульсных лидарных методов, что может обеспечить одновременную реализацию достоинств каждого из них на практике. Применение прямоугольных импульсных зондирующих сигналов в непрерывных ЛЧМ-лидарах способствует повышению энергетических характеристик и увеличению дальности действия таких систем.

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 // IX Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез. докл. Ч. 2. Томск, 1987. С. 239–242.
2. *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.
3. *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.
4. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971. 672 с.
5. *Петрухин Г.Д.* Фотоэлектронные умножители в режиме радиогетеродинамирования. М.: Радио и связь, 1983. 88 с.
6. *Шереметьев А.Г., Толпарев Р.Г.* Лазерная связь. М.: Связь, 1974. 384 с.
7. *Радиоприемные устройства* / Под общ. ред. В.И. Сифорова. М.: Советское радио, 1974. 560 с.
8. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
9. *А.с. СССР № 884088, МКИ Н 03 К 3/335, Н 03К 5/01.* Формирователь импульсов / Л.Р. Айбатов. Б.И. 1981. № 43. С. 281.