

## МЕТОД И СРЕДСТВО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ И КВАНТОВЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Медведев Н.В., Чичварин Н.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация

**Введение.** Материалы публикации содержат основные результаты исследований пространственной стабилизации в атмосферных (FSO) и квантовых линиях связи. Известны эксперименты по обмену секретным ключом по квантовому каналу между наземной станцией и самолетом. Результаты испытания были представлены в докладе на конференции QCrypt в Сингапуре, кратко о них пишет New Scientist. Обмен осуществлялся между передатчиком, установленным на движущемся самолете и приемником, который находился на крыше исследовательского центра. Сообщается, что стабилизация луча лазера осуществлялась системой зеркал. В предлагаемых материалах предлагается более простое и надежное решение на основе системы, во многом аналогичной тепловой головке самонаведения.

**1. Аналитический обзор доступной литературы. Цель и задачи исследований.** Целью исследований явился поиск технического решения для простой и надежной системы стабилизации приемной станции лазерных линий связи. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Разработка (выбор) оптической системы.
- Разработка математической модели системы стабилизации оптической оси.

**2. Основные результаты исследований.** Аналитический обзор доступной литературы [1 - 11] позволил заключить следующее:

- Любая FSO содержит в своем составе ту или иную подсистему стабилизации лазерного луча. В случае стационарных систем ее наличие обусловлено колебаниями тех или иных опор для установки приемопередающих станций.

- Квантовые линии связи нуждаются в подсистеме стабилизации в еще большей степени.

- Подавляющее большинство подсистем пространственной стабилизации выполняются в виде стабилизированных зеркал.

- Точное отслеживание луча осуществляется с помощью устройств, содержащих ПЗС. Собственно устройства реализуют алгоритм трейкинга. В этих устройствах не предусмотрено слежение за источником излучения.

Во многих случаях (и, в частности в мобильных линиях FSO) именно слежение за подвижными источниками излучения является настоятельно необходимым. В настоящей работе пред-

лагается применить гиросtabilизированную оптическую систему для решения задач стабилизации оптической оси и слежения за источником излучения. Попутно предлагается применить известные способы пространственной фильтрации для повышения помехозащищенности. По результатам аналитического обзора выбрана вращающаяся оптическая система, являющаяся одновременно трехступенным гироскопом с внутренним кардановым подвесом. Пусть положение главной оси трехступенного гироскопа  $z$  относительно корпуса (система координат  $x_k, y_k, z_k$  определяется углами  $\alpha$  и  $\beta$ ). Уравнения движения гироскопа имеют вид [12]:

$$J_1 \ddot{\alpha} + H \dot{\beta} \cos \beta_0 = M_1; \quad (1)$$

$$J_2 \ddot{\beta} - H \dot{\alpha} \cos \beta_0 = M_2, \quad (2)$$

где  $H = C\Omega$  - кинетический момент ( $C$  - осевой момент инерции ротора,  $\Omega$  - угловая скорость ротора);  $J_1$  - приведенный момент инерции гироскопа к оси вращения наружной рамки;  $J_2$  - приведенный момент инерции гироскопа к оси вращения внутренней рамки;  $\beta_0$  - начальное фиксированное значение угла поворота наружной рамки.

$b_1, b_2$ , - коэффициенты демпфирования (трения в подшипниках карданового подвеса). Левую и правую части уравнения (4) умножим на  $i = \sqrt{-1}$  и сложим уравнения (1) и (2) почленно, пренебрегая демпфированием:

$$J \frac{d^2 \bar{\varepsilon}}{dt^2} + H \frac{d \bar{\varepsilon}}{dt} \cos \beta_0 = M, \quad (3)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  - комплексный угол Эйлера.

Такая запись уравнений (1) и (2) позволяет называть управление системой стабилизации одноканальным. Если пренебречь нутационным движением гироскопа (коническими колебаниями оси гироскопа), т.е. положить вторую производную от углов Эйлера, равной нулю, то уравнения гироскопа приобретает простой вид:

$$H \dot{\beta} \cos \beta_0 = M_1;$$

$$H \dot{\alpha} \cos \beta_0 = M_2.$$

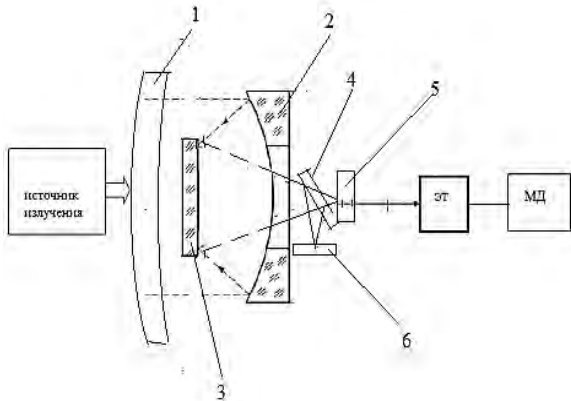
Уравнение (3) принимает вид

$$H \frac{d \bar{\varepsilon}}{dt} \cos \beta_0 = M. \quad (4)$$

То есть, скорость прецессии пропорциональна приложенному моменту. Таким образом, если обеспечить автоматическое наведение оси гирос-

скопа, совпадающей с оптической осью ОС на неподвижный источник излучения наземной станции и возможно измерение угловой скорости линии визирования, и следовательно, слежение за источником излучения передающей станции.. Для этого необходимо обеспечить обратную связь, т.е.  $M = M(\bar{\varepsilon})$ .

Объектив оптической системы (т.е. трехступенного гироскопа) формирует «точечное» изображение источника, который находится в практической бесконечности, т.е. на расстоянии, большем 100 фокусных (до 50 мм). Следовательно, на расстоянии, большим, чем 1000 м. изображение источника рассматривается, как пятно (т.н. пятно рассеяния). Структурная схема ОС приведена на рисунке 1. Следует отметить, что для уменьшения демпфирования и амплитуды нутаций карданов подвес выполнен внутри оптической системы.



1 – защитный мениск; 2 – главное зеркало, 3 – контрзеркало, 4 – блок светоделения; 5 – фотоприемник; 6 – лавинный фотодиод; эт – электронный тракт; мд – моментные датчики управления движением гироскопа (то есть оптической системы)

Рисунок 1 – Схема приемной части, устанавливаемой на мобильном объекте

Модулятор – анализатор изображения (МАИ) (рисунке 2) решает следующие задачи:

- Селектирует изображение цели от фонов (задача анализа).
- Модулирует излучение во времени – осуществляет амплитудно – фазовую модуляцию.
- Кодировывает положение изображения источника в полярной системе координат. Амплитуда кодирует величину рассогласования между линией визирования и оптической осью ОС. фаза – направление рассогласования.

Диск вращается с угловой скоростью вращения оптической системы (гироскопа). Происходит пространственно – временная модуляция потока от цели и фона (сектора и полудиск последовательно «наезжают» и «сезжают» с изображений цели и фона).

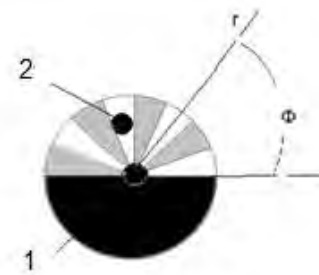


Рисунок 2 – Модулятор системы стабилизации (МАИ). 1-вращающийся диск, 2-изображение источника излучения

Если изображение 2 находится в центре, осциллограмма сигнала на выходе МАИ имеет вид (рисунке 3). В отсутствие фона, когда изображение цели находится в положении 2, сигнал на выходе МАИ имеет вид (рисунке 4).

Таким образом происходит и пространственная селекция изображений в плоскости анализа. Амплитуда сигнала от протяженного фона намного меньше амплитуды сигнала от источника передающей станции.

**Модуляция излучения и кодирование значений координат излучателя.** В отсутствие фона, когда изображение источника находится в положении 1, сигнал на выходе МАИ имеет вид (рисунке 3). Переменная составляющая сигнала равна нулю и управляющее воздействие на гироскоп отсутствует.

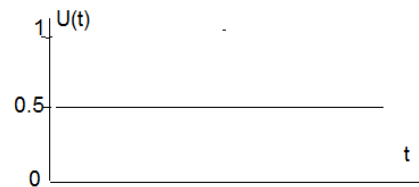


Рисунок 3 – Сигнал на выходе МАИ в отсутствие рассогласования

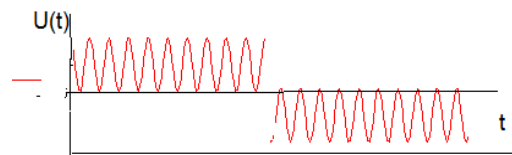


Рисунок 4 – Сигнал на выходе МАИ при рассогласовании, соответствующем случаю 2 на рисунке 2

При смещении изображения цели возникает переменный сигнал (Рис.4.). Очевидно, что при произвольном смещении изображения цели происходит соответствующий фазовый сдвиг. Идеализированная зависимость амплитуды сигнала от величины рассогласования (пеленгационная характеристика имеет вид (рисунке 5)). Условно показан резкий переход от линейного участка до насыщения. В случае, когда диаметр пятна рас-

сеяния настолько мал, что пятно допустимо считать точечным, мгновенному рассогласованию соответствует формирование максимальной амплитуды сигнала  $U(\Phi)$ .

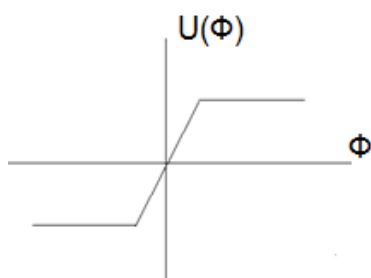


Рисунок 5 – Пеленгационная характеристика.  $U(\Phi)$  – амплитуда сигнала – величина рассогласования,  $\Phi$  – угол рассогласования

При «точечном» изображении источника излучения передающей станции пеленгационная характеристика является строго нелинейной и оптическая ось ОС находится в автоколебательном режиме, что по принципу Понтрягина обеспечивает максимальную скорость слежения за источником.

Уравнение управляющего сигнала  $U(r, \Phi)$  на выходе МАИ имеет вид:

$$U(r, \Phi) = A(r)F(2\pi v_t t + u(\Phi)), \quad (6)$$

где  $g$  – величина рассогласования,  $\Phi$  – направление рассогласования (фаза сигнала). Формула для вычисления потока на выходе МАИ имеет вид

$$F(r, \Phi) = \int_0^R \int_0^{\Phi_{max}} E(r-l, \alpha) H(l, \Phi) dl d\Phi, \quad (7)$$

где  $r$  – величина расстояния от центра МАИ до условного центра изображения,  $\Phi$  – угол рассогласования,  $E(r, \Phi)$  – распределение облученности в плоскости изображения ОС. Так одновременно производится стабилизация положения оптической оси при колебаниях носителя, пространственная фильтрация и измерение угловой скорости линии визирования для последующего слежения за положением источника излучения передающей станции в поле зрения ОС приемной станции.

Вторым аспектом настоящей публикации является вопрос о передаче сообщений с помощью FSO с применением методов квантовой криптографии. При использовании рассматриваемой оптической системы (Рис.1) возможны по меньшей мере три способа реализации квантовой линии:

- С применением лазерного излучения одновременно и для традиционной линии связи и для передачи ключа с применением квантовой криптографии. При этом при шифровке используются классические криптографические алгоритмы.

- С применением двухлучевой схемы приемопередающих станций. Излучение двух лазеров распространяется коаксиально. Излучение первого лазера используется для решения задачи пространственной стабилизации, а второго – для реализации квантовой линии связи.

- Путем применения одноканального излучателя и для обеспечения пространственной стабилизации и для передачи данных по квантовому протоколу.

Реализация каждого из трех способов возможна за счет снабжения оптической системы блоком светоделителя (рисунок 1, позиция 4).

**Заключение.** Описанное техническое предложение позволяет достаточно просто и надежно решить задачу стабилизации линий атмосферной и квантовой линий связи, построенных как раздельно, так и коаксиально.

1. Милинкис Б., Петров В. Атмосферная лазерная связь. Информост - Радиоэлектроника и Телекоммуникации №5(18), 2001.
2. Серопегин В.И. Беспроводные системы передачи данных локального, городского и регионального масштабов. Технология и средства связи, 1999, № 4, с. 72-77.
3. Гиносян Ю.А. Новые технологии беспроводного доступа. Технология и средства связи, 1999, № 4, с. 38-39.
4. Клоков А.В. Беспроводные ИК-технологии, истинное качество "последней мили". Технология и средства связи, 1999, № 5, с. 40-44.
5. Кулик Т. К., Прохоров Д.В. Методика сравнительной оценки работоспособности лазерных линий связи. Технология и средства связи, 2000, № 6, с. 8-18.
6. Кулик Т.К., Прохоров Д.В., Сумерин В.В., Хюппенен А.П. Особенности применения оптических линий связи. Лазер информ, 2001, вып. 9-10 (216-217), с. 1-6.
7. Феер К. Беспроводная цифровая связь: методы модуляции. — Пер. с англ. // Под. ред. В. И. Журавлёва. — М.: Радио и связь, 2000.
8. Официальный сайт: <http://www.iec.ch>, International Electrotechnical Commission (IEC), "Amendment 2 (2001)," *Safety of Laser Products—Part 1: Equipment Classification, Requirements, and User's Guide*, IEC 60825-1 (IEC, 2001). New classification standard adopted as of 1 March 2001. (последний доступ – 10.08.2016.).
9. Официальный сайт: <http://www.photonicsdirectory.com>, *The Photonics Directory* (Laurin Publishing, Pittsfield, Mass., 2002), (последний доступ – 10.08.2016.).
10. D. Sliney and M.Wolbarsht, *Safety with Lasers and Other Optical Sources* (Plenum, New York, 1980).
11. U.S. Center for Devices and Radiological Health

- (CDRH), Laser Product Performance Standard, *Code of Federal Regulations*, Vol. 21, Section 1040 (21 CFR 1040) (CDRH, Washington, D.C., 2002).
12. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. – Л.: Судостроение, 1968. – 348 с.
13. Официальный сайт: [www.krdu-mvd.ru/\\_files/kafedra\\_ib/17.pdf](http://www.krdu-mvd.ru/_files/kafedra_ib/17.pdf), «Технические средства и методы защиты информации», (последний доступ – 10.08.2016.).
14. Charles H. Bennett, Francois Bessette, Gilles Brassard, Louis Salvail, and John Smolin, «Experimental Quantum Cryptography», *J. of Cryptography* 5, 1992.

УДК 681.2.08

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ АНАЛОГОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Измеритель контактной разности потенциалов (КРП) представляет собой электрометр с динамическим конденсатором, отличительной особенностью которого являются существенно уменьшенные размеры и емкость динамического конденсатора. Если в обычных электрометрах с динамическим конденсатором площадь пластин составляет величину порядка нескольких квадратных сантиметров, то в случае измерителей КРП практический интерес представляют размеры не более 1 мм. Измерители уменьшенных размеров представляют особый интерес для сканирующих систем, например, для сканирующего зонда Кельвина, а также для систем контроля различных технологических процессов, например, при трении. При этом измерительный сигнал с динамического конденсатора чрезвычайно мал, порядка минимально разрешимых с точки зрения современной аналоговой электроники. Кроме того, динамический конденсатор для электрометров представляет собой закрытую, полностью экранированную систему, что в случае измерений КРП сделать практически невозможно. Поэтому к измерителям КРП предъявляются повышенные требования как с точки зрения собственных шумов и защиты от внешних наводок, так и с точки зрения тщательной проработки механического и схемотехнического дизайна.

Целью работы являлась разработка функциональных структур и схемотехнического дизайна аналоговых измерителей КРП с использованием современной электронной базы, отличающихся от аналогов малыми габаритами, высокой чувствительностью и помехозащищенностью.

Структурная схема разработанного измерителя КРП приведена на рисунке 1. Входной каскад состоит из конденсатора, образованного поверхностями измерительного электрода  $M_1$  и заземленного измеряемого образца  $M_2$ , и входного высокоомного предусилителя. Под действием электромеханического модулятора одна из пластин конденсатора вибрирует на частоте соб-

ственного механического резонанса относительно измеряемой поверхности  $M_2$ .

Электрическая емкость при периодическом изменении расстояния между обкладками динамического конденсатора также периодически изменяется со временем. При достаточно большом сопротивлении резистора  $R_{II}$  заряд не будет успевать полностью стекать с обкладок конденсатора за период изменения емкости, что вызовет появление на инвертирующем входе предусилителя 4 переменного потенциала. Усиленный сигнал с предусилителя поступает на вход фазочувствительного детектора 6. Далее выпрямленное напряжение через интегратор 7 подается на неинвертирующий вход предусилителя 4 для компенсации КРП, тем самым обеспечивается отрицательная обратная связь автокомпенсации измеряемой величины.

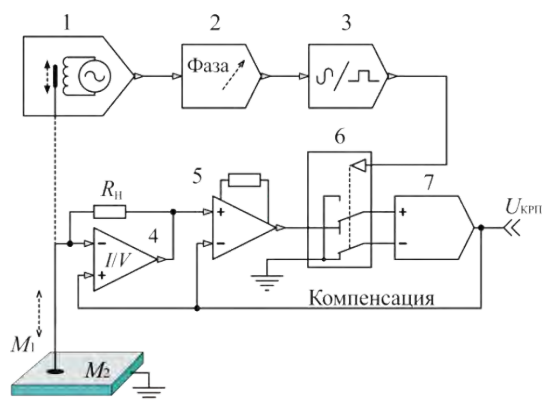


Рисунок 1 – Структурная схема аналогового измерителя контактной разности потенциалов:  $M_1$ ,  $M_2$  – поверхности зонда и измеряемого образца, соответственно; 1 – модулятор вибрации; 2 – фазосдвигатель; 3 – формирователь сигнала; 4 – преобразователь ток-напряжение; 5 – инструментальный усилитель; 6 – фазочувствительный детектор с коммутируемыми ключами; 7 – интегратор;  $U_{КРП}$  – выходной сигнал контактной разности потенциалов.