

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 616.34-071.2

УСТРОЙСТВО ВИДЕОКАПСУЛЬНОЙ ЭНДОСКОПИИ С ЛАТЕРАЛЬНЫМ И АКСИАЛЬНЫМ ОБЪЕКТИВАМИ

Фадеев Н. И.

В данном исследовании проведен анализ существующих решений для видеокапсульной эндоскопии. Выявлены преимущества и недостатки современных систем беспроводной эндоскопии. В соответствии с анализом предложена функциональная схема устройства видеокапсульной эндоскопии с возможностью передачи изображения по радиоканалу, и наличием аккумуляторов с беспроводной зарядкой. Произведена оценка эффективности метода радиопередачи при непосредственной работе капсулы и в режиме заряда. Предложена оптимальная с точки зрения размеров и функциональных возможностей элементная база. Описан алгоритм работы основных функциональных узлов, а также подход к их использованию. Сформулированы преимущества предложенного решения над современными аналогами.

Ключевые слова: КМОП матрица, система на кристалле, панорамное изображение, ПЛИС, радиопередача, фазовая манипуляция, аккумулятор, беспроводной заряд.

На современном этапе развития медицины существует ряд методов позволяющих визуально оценить заболевания тонкого кишечника. К ним относят: колоноскопия, компьютерная томография, баллонная эндоскопия, капсульная эндоскопия.

Обзор существующих решений

Видеокапсульная эндоскопия чаще всего используется при диагностике кровотечений неясной этиологии (*obscure gastrointestinal bleeding*). Показанием к проведению капсульной эндоскопии также являются подозрение на болезнь Крона, опухоли тонкой кишки, повреждение тонкой кишки в результате приёма нестероидных противовоспалительных медикаментов, целиакии, а также наследственные полипозы [1]. Видеокапсульная эндоскопия является информативным способом диагностики тонкого кишечника, длина которого не позволяет исследовать его классическими эндоскопическими средствами. На современном этапе существует множество видеокапсул, которые можно разделить на капсулы с аксиально расположенными и латерально расположенными объективами [2].

В [3–5] отмечается, что низкая чувствительность видеокапсул с аксиально расположенными объективами к ангиэкстазиям, дивертикулам и др. получается из-за возникновения большого числа слепых зон в процессе перемещения по извилистым каналам тонкого кишечника. Пример случаев возникновения подобных зон представлен на рисунке 1.

Исследования [7-9] показывают, что диагностический выход капсул с латеральными объективами на 32% больше выхода капсул с аксиально расположенными объективами.

Изображения, полученные с помощью панорамных систем высокоинформативны, но крайне тяжело анализируемы, поскольку в них отсутствует визуализация просвета полого органа [10]. Это требует долгой адаптации врача-эндоскописта и, соответственно, ведет к увеличению времени интерпретации результатов анализа, что увеличивает временные и финансовые затраты на исследование. Поэтому существует потребность в фиксации одновременно панорамного изображения и изображения просвета кишечника.

© Фадеев Н. И., 2020.

Фадеев Никита Иванович (ssaufadeev@gmail.com), студент IV курса факультета электроники и приборостроения Самарского университета, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

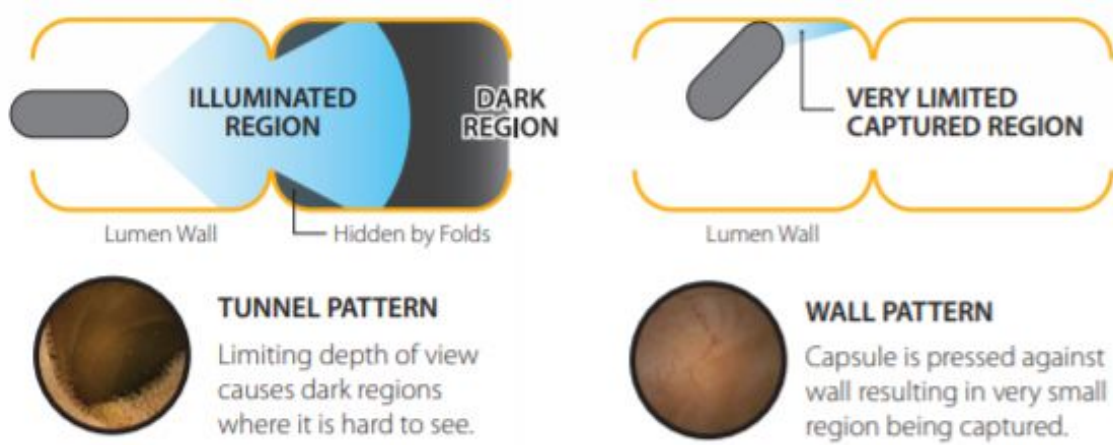


Рис. 1. Малоинформативные кадры классической аксиальной видеокапсулы [6]

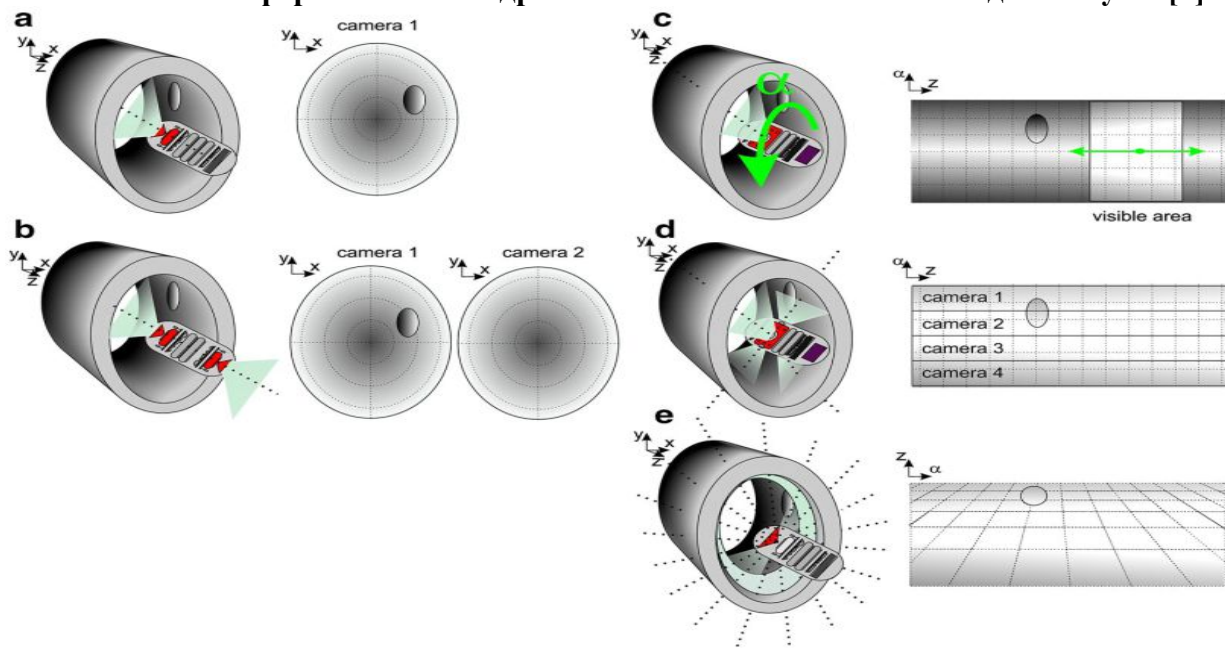


Рис. 2. Положение объектов в пространстве и на изображении для разных типов объективов [2]

Параметры пространства изображения важны при 3-D реконструкции, при локализации капсулы и особенно при определении размеров объектов на изображении [2]. Всего существуют несколько типов объективов видеокапсул (рис. 2) **a**, **b** – капсулы с аксиально расположенными объективами, **c** – с возможностью вращения матрицы вокруг неподвижной оси, **d** – объектив представляет собой несколько латерально расположенных матриц, **e** – изображение на матрице формируется с помощью конусообразного зеркала. По данным [2] минимум aberrаций и соответственно наименьшее число ошибок характерно для случая – **d**. Поэтому формирование панорамного изображения с помощью нескольких матриц предпочтительнее.

Реализация высокоточной оптической системы, состоящей из линз, зеркал и матриц

требует значительных финансовых затрат. Требования к качеству изготовления линз, зеркал, к допускам во время сборки конструкции увеличивают стоимость медицинского диагностического изделия. С развитием технологий печати систем на кристалле, КМОП матрицы становятся все более миниатюрными и доступными [11, с. 5-6]. Поэтому объектив панорамных капсул, состоящий из нескольких матриц экономически выгоднее конструкции с конусным зеркалом.

Предлагаемое решение

Учитывая преимущество и недостатки имеющихся решений, предлагается вариант конструкции видеокапсулы (рис. 3), с характеристиками, представленными в таблице 1. Глубина резкости достигается с помощью линз, расположенных на стенках капсулы.

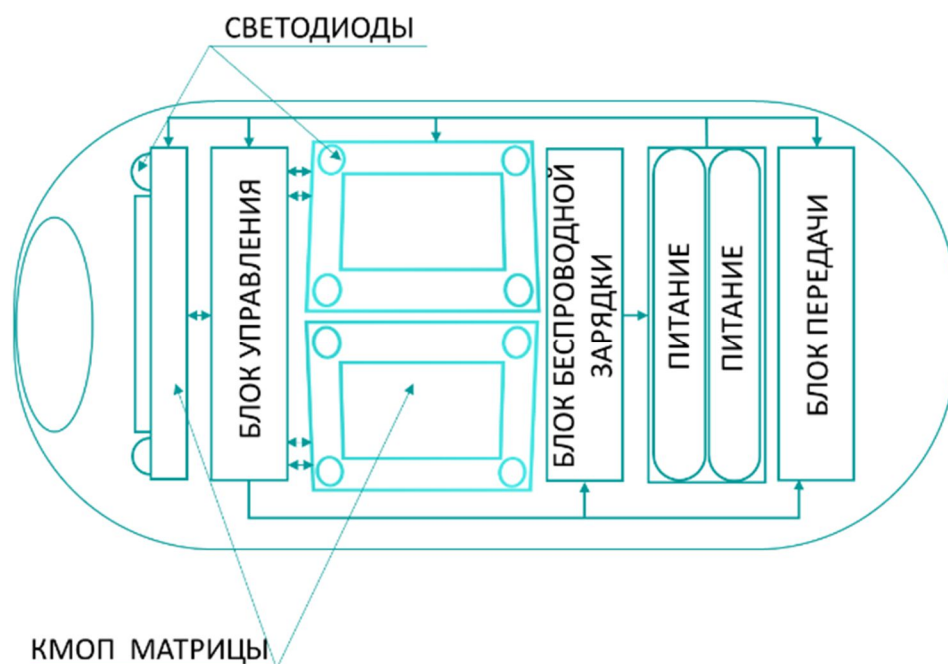


Рис. 3. Функциональная схема видеокапсулы

Таблица 1

Технические характеристики проектируемого устройства

№ п/п	Показатель	Значение	Единицы измерения	Примечание
1	глубина резкости	0-6	см	(не менее)
2	разрешение	256x256	пикс.	
3	угол обзора латерально	360	град.	
4	угол обзора аксиально	156	град.	(не менее)
5	кол-во часов в автономном режиме	8	ч	(не менее)
6	кадров в секунду	10	кадров/сек	(не менее)
7	габариты	13x30	мм	(не более)
8	передача информации на внешнее устройство			
9	бесконтактный заряд аккумуляторов			

Таблица 2

Параметры КМОП матрицы

Параметр	значение	размерность
Размеры	1x1	мм
Разрешение	249x250	пикс.
Способ передачи сигнала	LVDS	
Интерфейс	I2C	
Частота восходящего потока	2,5	МГц
Частота нисходящего потока	30	МГц
Потребление	4,7	мВт
Глубина цвета	10	бит

Выбор КМОП матриц

Основными критериями в выборе КМОП матриц в данном случае являются: размер и потребляемая мощность. Система на кристалле NanEye – матрица размером 1x1 мм

и потреблением 4,2мВт имеет 4 вывода. Два вывода для питания и два вывода LVDS - линия низковольтной дифференциальной связи, по которой осуществляется связь с внешними устройствами. NanEye произведена для

применения в эндоскопических устройствах. Технические параметры представлены в таблице 2 [12].

Матрица работает по алгоритму, представленному на рисунке 4. При подаче питания происходит инициализация и начинается передача синхронизирующего пакета. После синхронизации NanEye отправляет пакетами в 12 bit (start bit + 10 bit + stop bit) значения каждого пикселя слева направо в строке, и

сверху вниз по строкам. После этого камера принимает управляющие биты по интерфейсу I2C используя ту же линию LVDS и цикл повторяется. Таким образом происходит последовательная отправка кадров с частотой 44-62 fps. Матрица полностью автономна, управление позволяет задать, усиление АЦП, уровень черного, а также сбрасывать строки, задавая тем самым время экспозиции.

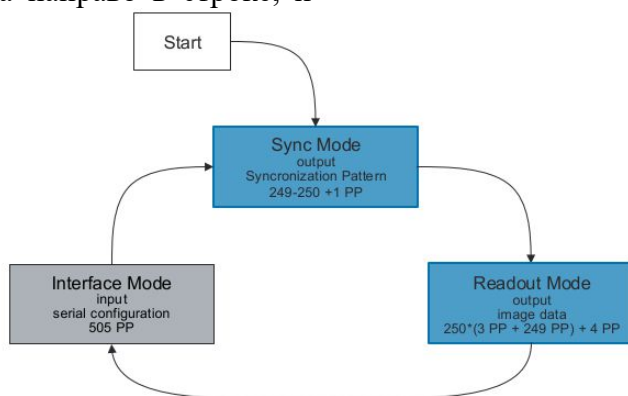


Рис. 4. Алгоритм работы NanEye [12]

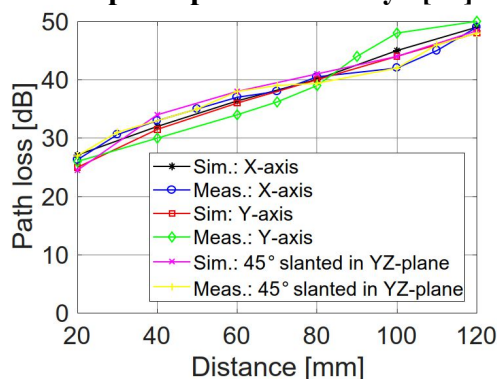


Рис. 5. Экспериментальные зависимости и зависимости, полученные в результате симуляции потерь сигнала в Дб от толщины ткани в мм, при различной ориентации антенны [14]

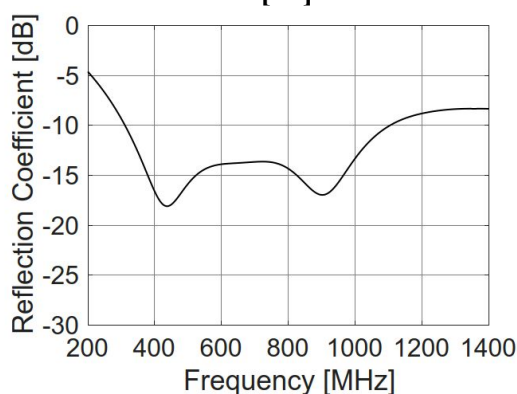


Рис. 6. Коэффициент отражения антенны в среде организма [14]

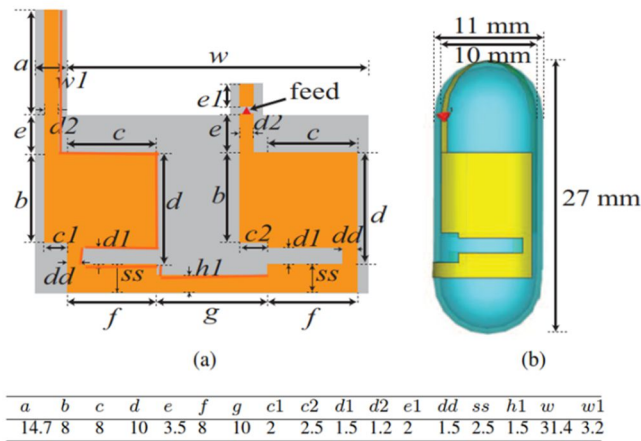


Рис. 7 - а - петлевая антенна и ее параметры, б – петлевая антенна, нанесенная на поверхность капсулы [14]

Таблица 3

Характеристики РСС114 [15]

Параметр	Значение	Размерность
КПД	До 75 %	
диапазон частот	100 МГц–6 GHz	
диапазон мощности	-17...20	Дбм
входное сопротивление	50	Ом
размер	1x0.6x0.3	мм
выходное напряжение	4,2	В
выходной ток	100	мА

Выбор блока управления

Для реализации управления капсулой используется ПЛИС. Основные требования — это наличие достаточного количества портов LVDS, компактные размеры кристалла. Необходимо иметь буфер емкостью в 1 кадр матрицы т.е. 249x250 * 10 = 623 килобит, а также внутреннюю память программ.

ПЛИС семейства MachXO3 обладают габаритами от 3.5x3.5 mm до 9x9 mm, внутренней постоянной памятью до 448 килобит + 2 мегабит, SRAM до 438+73 килобит, внутренний PLL [13].

Устройство поочередно включает камеры, синхронизируется, принимает 1 кадр, записывает в буфер и выключает камеры. Одновременно с этим информация из буфера отправляется на внешний приемник с помощью радиопередачи с частотной модуляцией.

Выбор передатчика

В данном решении используется петлевая антенна, нанесенная на поверхность капсулы (рис. 7) [14]. Сигнал формируется фазовой манипуляцией, несущая частота

которого 430МГц, с помощью встроенного PLL (ФАПЧ) и порта LVDS. Мощность сигнала на поверхности тканей $P_{\text{поверх}}$ зависит от коэффициента отражения $K_{\text{отраж.дб}} = -17,5$ Дб (рис. 6) и от поглощения радиоволн тканями $K_{\text{погл.дб}} = 50$ Дб (рис. 5). Поскольку сигнал управления антенной представляет собой меандр необходимо учесть, что мощность излучения антенны будет зависеть от соотношения мощностей гармоник в цифровом сигнале. Рассчитаем долю мощности 1 гармоники $\frac{P_1}{P_{\text{полн.}}}$ с помощью Фурье-пре-

$$\text{образования } \frac{P_1}{P_{\text{полн.}}} = \frac{\left(\frac{4U}{\pi}\right)^2}{2U^2} = 0.8.$$

Тогда учитывая все изложенные выше факторы мощность сигнала на поверхности ткани будет $P_{\text{поверх}} = P_{LVDS} \cdot K_{\text{погл.дб}} \cdot (1 - K_{\text{отраж.дб}}) \cdot \frac{P_1}{P_{\text{полн.}}} = 9,43$ нВт, где $P_{LVDS} = I_{LVDS}^2 \cdot R = 1,225$ мВт

В таком случае приемник должен обладать чувствительностью: $S = 10 \log \left(\frac{P_{\text{поверх}}}{1\text{мВт}} \right) = -50,26$ Дбм

Выбор схемы заряда

Заряд аккумуляторов осуществляется посредством харвестерного устройства преобразующего энергию радиоволн в энергию электрического тока. Основные критерии

выбора RF-DC преобразователя это частотный диапазон, согласованный с антенной и компактность.

Харвестер PCC114 имеет характеристики, представленные в таблице 3.

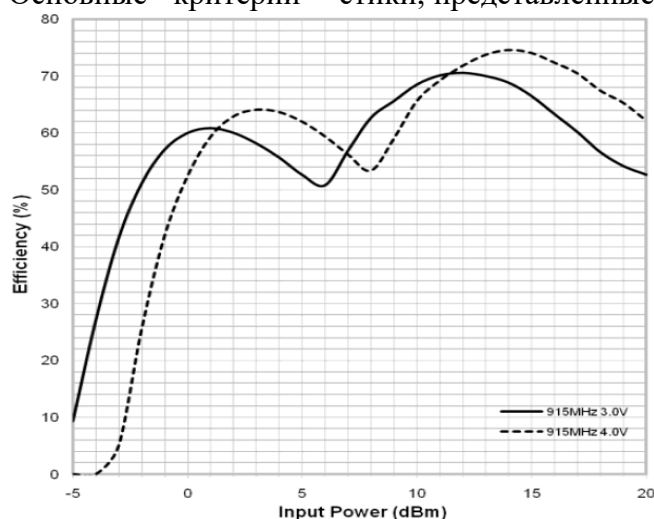


Рис. 8. Зависимость КПД от частоты и входной мощности [15]

Таблица 4

Характеристики искусственного источника освещения

Параметр	Значение	Размерность
Размер	1x0.5x0.45	мм
Прямой номинальный ток	20	мА
Номинальное напряжение	3,6	В
Угол излучения	120	град.
Цвет	белый	
Мощность рассеивания	100	мВт
Рабочая температура	-40...+85	°С

Таблица 5

Характеристики аккумуляторов

Параметр	Значение	Размерность
Ёмкость	55	мАч
Напряжение	3,8	В
Габариты (Ø x h)	10x10	мм
Максимальное напряжение заряда	4,35	В
Максимальный ток заряда	60	мА
Максимальный ток разряда	120	мА

Наибольшее КПД достигается, когда на вход харвестера поступает сигнал с частотой 915 МГц (рис. 8). На этой же частоте коэффициент отражения антенны минимален и составляет $K_{\text{отраж.дб}} = -17,5\text{дБ}$ (рис. 6). Мощность заряда $P_{\text{заряд}}$ в этом случае составит $100\text{мВт} \cdot 0,62 = 62\text{мВт}$ (рис. 8).

Тогда время заряда составит: $t_{\text{заряд}} = \frac{C_{\text{акк}} \cdot U_{\text{акк}} \cdot 2}{P_{\text{заряд}}} = 7,2$ часа, где $C_{\text{акк}} = 53\text{мАч}$, $U_{\text{акк}} = 3,6\text{В}$ [16].

Выбор источников освещения

Для реализации источника искусственного освещения применяются импульсные светодиоды SMD 0402 UWC, размером 1x0.5x0.45 мм с углом излучения 120° и номинальным напряжением 3,3В. Характеристики сведены в таблицу 4 [16].

Выбор элементов питания

Основными требованиями к аккумулятору – это достаточная емкость, и габариты.

Аккумуляторы GP M10 - 10 имеют характеристики, представленные в таблице 5 [17].

Заключение

Таким образом, конструкция, функциональная схема которой представлена на рисунке 4, имеет следующие преимущества: Наличие как трех латеральных, так и аксиального объектива, что позволяет получать высокоинформативные кадры и одновременно сокращает время интерпретации результатов, поскольку врачу эндоскописту нет нужды адаптироваться к панорамному формату. Изображение с латеральных объективов формируется посредством трех матриц и линз т.е. не используется сложная и дорогая в производстве оптическая система. К тому же формирование изображения вышеизложенным способом уменьшает количество aberrаций и ошибок при 3D реконструкции и определении размеров объектов на изображении. Информация с камер транслируется на внешнее устройство в реальном времени - преимущество которого лишены существующие панорамные решения. Капсула обладает аккумуляторами и возможностью их заряда, что позволяет использовать ее повторно и сокращает, тем самым затраты на исследование, делая процедуру доступнее.

Литература

1. Van de Bruaene C, De Looze D, Hindryckx P. Small bowel capsule endoscopy: Where are we after almost 15 years of use? *World J Gastrointest Endosc* 2015; 7(1): 13-36
2. Koprowski R. Overview of technical solutions and assessment of clinical usefulness of capsule endoscopy // *BioMed Eng OnLine*. 2015. Vol. 14. P. 111.
3. Tenembaum D., Sison C., Rubin M. Accuracy of community based video capsule endoscopy in patients undergoing follow up double balloon enteroscopy // *World J. Gastrointest Endosc.* 2013. Vol. 16. Pt. 5(4). P. 154–159.
4. Comparison of the diagnostic yield of «MiroCam» and «PillCam SB» capsule endoscopy / Hong S. P., Cheon J. H., Kim T. I. [et al.] // *Hepatogastroenterology*. 2012. Vol. 59. P. 778–781.
5. A multicenter randomized comparison of the Endocapsule and the Pillcam SB / Cave D. R., Fleischer D. E., Leighton J. A. [et al.] // *Gastrointest Endosc.* 2008. Vol. 68. P. 487–494.
6. Рекламная Брошюра капсулы CapsoCam PLUS [Электронный ресурс] / Официальный сайт дистрибьютора Nicolai-Medizintechnik. URL: https://www.nicolai-medizintechnik.de/dokumente/CapsoCam_2016.pdf (дата обращения 23.10.2019)
7. Friedrich K, Gehrke S, Stremmel W, Sieg A. First clinical trial of a newly developed capsule endoscope with panoramic side view for small bowel: a pilot study // *J Gastroenterol Hepatol*. 2013. Vol. 28. P. 1496-1501.
8. Advance of video capsule endoscopy and the detection of anatomic landmarks / Nakamura M., Ohmiya N, Shirai O. [et al.] // *Hepatogastroenterology*. 2009. Vol. 56. P. 1600-1605.
9. Capsule Endoscopy to Detect Normally Positioned Duodenal Papilla: Performance Comparison of SB and SB2 / Park S., Chun H. J., Keum B. [et al.] // *Gastroenterol Res. Pract.* 2012. Vol. 20. P. 29–35.
10. Первый опыт применения у детей инновационной эндоскопической видеокapsульной системы с панорамным обзором / М. М. Лохматов, Т. Н. Будкина, В. И. Олдаковский [и др.] // *Педиатрическая фармакология*. 2016. № 13(6). С. 587–591.
11. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
12. Техническая документация к матрице NanEye 2D [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании AMS. URL: <https://ams.com/naneyeye> (дата обращения 23.04.2020).
13. Техническая документация к ПЛИС MachXO3 [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Lattice Semiconductor. URL: <https://www.latticesemi.com/Products/FPGAandCPLD/MachXO3> (дата обращения 23.04.2020).
14. Design of Novel S-Shaped Quad-Band Antenna for MedRadio/WMTS/ISM Implantable Biotelemetry Applications / С.-К. Wu, Т. F. Chien, С.-L. Yang [et al.]. // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2012. Vol. 10. P. 1–12.
15. Техническая документация к RF-DC преобразователю PC114 [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании

Powercast. URL: <https://www.powercastco.com/products/powerharvester-receivers/> (дата обращения 23.04.2020).

16. Техническая документация к светодиодам SMD0402UWC [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании DART. URL: <http://www.dart.ru/pdf/02-04%20LEDs%20SMD.pdf> (дата обращения 23.04.2020).

20SMD.pdf (дата обращения 23.04.2020).

17. Техническая документация к аккумуляторам GP M10-10 [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании GP. URL: <https://ind.gpbatteries.com/application/gp-mini-lithium-m10-series.html> (дата обращения 23.04.2020).

CAPSULE ENDOSCOPY WITH LATERAL AND AXIAL CAMERA

Fadeev N. I.

In this study was analyzed present capsule endoscope, was found advantages and disadvantages modern wireless capsule systems. According this analysis was offered functional diagram of wireless capsule endoscope with radio antenna and with rechargeable battery with wireless charge. Also here was evaluated effectiveness of radio channel to communication and to charge. Was offered optimal compact element base. Was described work algorithm of major modules. Study formulated advantage this solution over modern analogs.

Key words: CMOS sensor, SoC, panoramic image, FPGA, radio transmission, phase shift keying, rechargeable battery, wire-less charge.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.

© Fadeev N. I., 2020.

Fadeev Nikita Ivanovich (ssaufadeev@gmail.com),
student IV course of the Faculty of Electronics and instrument engineering of the Samara University,
443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.