



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по Телекомуникации

Катедра Радиокомуникации и видеотехнологии

маг. инж. Йордан Георгиев Ковачев

**ЗАВИСИМОСТ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА
FSO СИСТЕМИ ОТ РАЗХОДИМОСТТА НА ОПТИЧНОТО
ЛЪЧЕНИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5 Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Кабелни и оптични комуникационни системи

Научен ръководител: доц. д-р. Цветан Мицев

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет Телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 26.02.2018.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 21.06.2018 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-83 / 12.03.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Цветан Мицев– председател
2. проф. д-р инж. Александър Бекарски– научен секретар
3. проф. д-р инж. Добри Добрев
4. проф. д-р инж. Кирил Конов
5. доц. д-р инж. Габриела Атанасова

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Александър Бекарски
2. проф. д-р инж. Добри Добрев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по Телекомуникации на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1254.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ на факултет Телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Йордан Ковачев

Заглавие: Зависимост на функционалните показатели на FSO системи от разходимостта на оптичното лъчение

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

Актуалност на проблема

С увеличаването на броя на абонатите и изискването за все по-високоскоростно предаване на данни безжичните оптични комуникационни системи (FSO) се превръщат в добра алтернатива на познатите радиокомуникационни системи. Те комбинират високоскоростно предаване на данни, лесно интегриране в градска среда и липсата на необходимост да се лицензират използваните честотни ленти.

Основен недостатък на FSO системите е непредвидимата надеждност на канала за връзка поради множеството случайни фактори, които влияят на разпространението на лазерното лъчение в атмосферата. Съвременните изследвания се фокусират основно върху борбата с негативното влияние на дребно мащабните турбулентни нееднородности върху разпространението на лазерното лъчение в атмосферата посредством използване на: апертурно осредняване, използване на хибридни RF/FSO системи, поляризиране на оптичното лъчение и използване на системи за следене и насочване на оптичните терминали. Слабо засегнати са системите за борба със случайните механични вибрации на предавателните антени, като съществуващите изследвания са фокусирани върху разработката на системи за следене и насочване на терминалите.

Важно е да се отбележи, че не е изследвана възможността за използването на оптимален ъгъл на разходимост на оптичното лъчение и възможността за разработване на FSO способна адаптивно да променя ъгъла на разходимост на оптичното лъчение (поддържайки винаги неговата оптимална стойност в зависимост от атмосферните условия) като метод за борба със случайните отмествания на лазерния лъч от първоначалната му посока на разпространение, т.е. като метод за подобряване на функционалните показатели на FSO системите.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационното изследване: **да се разработи метод и устройство за повишаване на надеждността на FSO системи в зависимост от разходимостта на оптичното лъчение.** За изпълнението на тази цел, са формулирани следните задачи:

1. Да се създаде на метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.
2. Да се разработи устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.
3. Да се проведат експериментални изследвания на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

Научна новост

Разработени са методи за определяне на оптималния ъгъл на разходимост на оптичното лъчение при отчитане на вътрешните и външните за приемника шумове, като са взети предвид всички фактори влияещи негативно върху разпространението на лазерния лъч в атмосферния канал.

Разработен е обобщен метод и е изведено е крайно уравнение за определяне надеждността на работа на FSO оптични безжични системи, вземайки предвид далечината на видимост в атмосферния канал и случайните флуктуации в посоката на разпространение на лазерния лъч.

Предложено е разработването на устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

Практическа приложимост

Предложени са и са разработени схемни реализации за два варианта на устройство за управление на разходимостта на лазерния лъч: с използване на Voice-Coil Motor (VCM) и с използване на Brushless DC мотор.

Проведени са симулации на работата на FSO система (мобилна и стационарна) способна да адаптира ъгъла на разходимост на оптичното лъчение, поддържайки винаги неговата оптимална стойност. Надеждността ѝ е сравнена с надеждността на работа на FSO система, използваща фиксиран ъгъл на разходимост на оптичното лъчение. На основата на проведенния задълбочен анализ на извършените експериментални изследвания определено се доказва, че винаги използването на предложия оптимален ъгъл на разходимост $\theta_{t,opt}$ подобрява надеждността на работа на FSO от 10% до 20%.

Апробация

Резултатите от дисертационното изследване са апробирани в четири пленарни доклада на международни конференции, един пленарен доклад на национална конференция и един постерен доклад на международна конференция.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в национални и международни издания. Общият брой на статиите е осем, от които има една самостоятелна. Две от статиите са публикувана в международни списания. Четири от статиите са публикувани в материали на международни конференции и две статии – в национални конференции.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 148 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 108 литературни източници, като 100 са на латиница и 3 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 61 фигури и 8 таблици.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ПРЕГЛЕД НА МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА FSO СИСТЕМИ

В глава 1 е направен кратък обзор на съществуващите методи и средства за повишаване на функционалните показатели на FSO системи.

Разгледани са основните методи за повишаване на капацитета на канала C_1 на FSO системите. От направения обзор става ясно, че типичните оптични похвати за повишаване на C_1 (мултиплексиране по дължина на вълната DWDM и CWDM, както и мултиплексиране на лъчения с различна поляризация) дават най-добри резултати ($C_1 = 1,28 \text{ Tb/s}$).

Достигането на такива скорости поставя въпроса за надеждността на работа на FSO. За целта са изследвани наличните методи за повишаване на надеждността на FSO системите: използване на системи за следене и насочване на оптичните терминали; кодиране на предаваната информация в оптичните безжични комуникационни системи; подбиране на оптимални стойности на нейните параметри; използване на relay-assisted amplify-and-forward FSO; използване на хибридни RF/FSO системи.

Подчертано е, че съществуват сравнително малко разработки, изследващи зависимостта между системните параметри и функционалните показатели на FSO системите и по-специално тяхната надежност. Проведеният анализ, свързан със зависимостта на функционалните показатели на FSO системите от разходимостта на оптичното лъчение, показва, че правилното подбиране на системните параметри (разходимост на лазерното лъчение) може да доведе до значително по-надеждна работа на оптичните FSO комуникационни системи. Това аргументира необходимостта от нови допълнителни теоретични и експериментални изследвания на зависимостта на функционалните показатели на FSO системите от разходимостта на оптичното лъчение в настоящия дисертационен труд.

Въз основа на извършения преглед и анализ на съществуващите методи и средства за повишаване на функционалните показатели на FSO системите са дефинирани следната цел и задачи на дисертационния труд:

Цел на дисертацията:

Да се разработи метод и устройство за повишаване на надеждността на работа на FSO системи в зависимост от разходимостта на оптичното лъчение.

Задачи на дисертацията:

- Да се създаде метод за повишаване на надеждността на работа на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.
- Да се разработи устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване на надеждността на работа на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

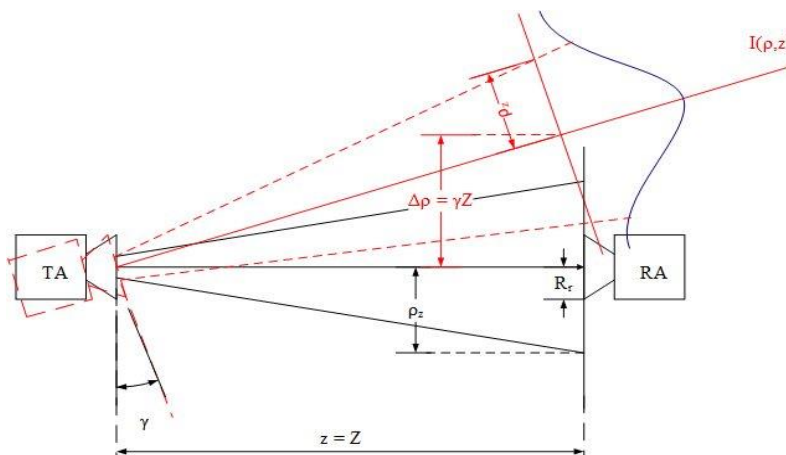
- Да се проведат експериментални изследвания на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

ГЛАВА 2. СЪЗДАВАНЕ НА МЕТОД ЗА ПОВИШАВАНЕ НА НАДЕЖДНОСТТА НА FSO СИСТЕМИ ЧРЕЗ ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЪГЪЛА НА РАЗХОДИМОСТ НА ОПТИЧНОТО ЛЪЧЕНИЕ

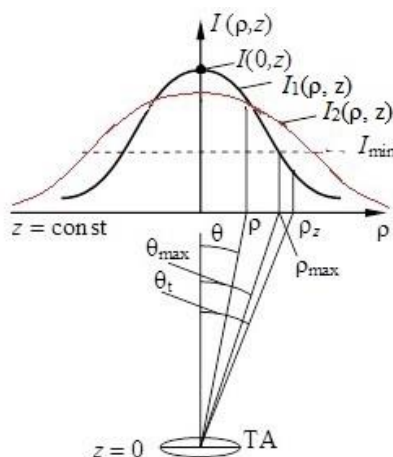
В глава 2 е създаден метод за повишаване на надеждността на работа на FSO системи, чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение, като основни моменти в нея са:

2.1 Геометричен модел за определяне на оптималния ъгъл на разходимост на лазерното лъчение при отчитане на вътрешните шумове на приемника

Представен е геометричен модел на случайните флуктуации в посоката на разпространение на лазерното лъчение (фиг. 2.1). Дефиниран е оптималния ъгъл на разходимост, който минимизира негативното влияние на тези флуктуации (фиг. 2.2).



Фигура 2.1. Отклонение на лазерния лъч от първоначалната му посока на разпространение



Фигура 2.2. Разпределение на интензивността на оптичното лъчение в равнината на приемната апертура

Фиг. 2.2 показва, че с увеличаване на ъгъла на разходимост се увеличава максимално допустимото ъглово отклонение на лъча от първоначалната му посока $\theta_{\max}$. Очевидно е, че тази тенденция ще продължава до определена гранична стойност на θ_t , след която увеличаването на ъгъла на разходимост ще намалява максимално допустимото ъглово отклонение на лъча $\theta_{\max}$. Тази гранична стойност ще бъде отбелязана с $\theta_{t, \text{opt}}$ и ще бъде наричана оптимален ъгъл на разходимост.

2.2 Математически модел за определяне на оптималния ъгъл на разходимост на лазерното лъчение при отчитане на вътрешните шумове на приемника

За определяне на оптималния ъгъл на разходимост на лазерното лъчение първо е необходимо да се определи минималната стойност на BER , която удовлетворява работата на FSO:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{SNR}{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(Q), \quad (2.2.1)$$

където

$$SNR = \left(\frac{e}{ch} \right)^2 \frac{\lambda_0^2 \eta^2 R_{FB}^2 \langle \Phi_L \rangle^2}{\langle u \rangle^2} \quad (2.2.2)$$

и

$$\langle u^2 \rangle = \langle u_f^2 \rangle + \langle u_Q^2 \rangle + \langle u_{PA}^2 \rangle \quad (2.2.3)$$

Изведени са аналитични изрази за определяне на оптималния ъгъл на разходимост и съответно оптималния радиус на оптичното лъчение:

$$\theta_{t, \text{opt}} = \frac{1}{z} \sqrt{\frac{2\tau_t \tau_r \tau_a R_r^2 \Phi_L}{e \Phi_{PD} |_{SNR=\text{const}}}} \quad (2.2.4)$$

$$\rho_{z, \text{opt}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_z \sqrt{\ln \left(\frac{2 \tau_t \tau_a \Phi_L}{\pi \rho_z^2 (1 - e^{-2}) I_{\min}} \right)}, \quad e = 2.7183 \quad (2.2.5)$$

За определяне на максимално допустимите линейни отклонения между оста на Гаусвия лазерен лъч и центъра на приемната апертура е изведена зависимостта:

$$\rho_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_z \sqrt{\ln \left(\frac{2 \tau_t \tau_a \Phi_L}{\pi \rho_z^2 (1 - e^{-2}) I_{\min}} \right)}, \quad e = 2.7183 \quad (2.2.6)$$

Минималната интензивност на лъчението, необходима за постигане на оптимален БРОЛ е:

$$I_{\min} = \frac{\Phi_{PD} |_{SNR=\text{const}}}{\pi \tau_r R_r} \quad (2.2.7)$$

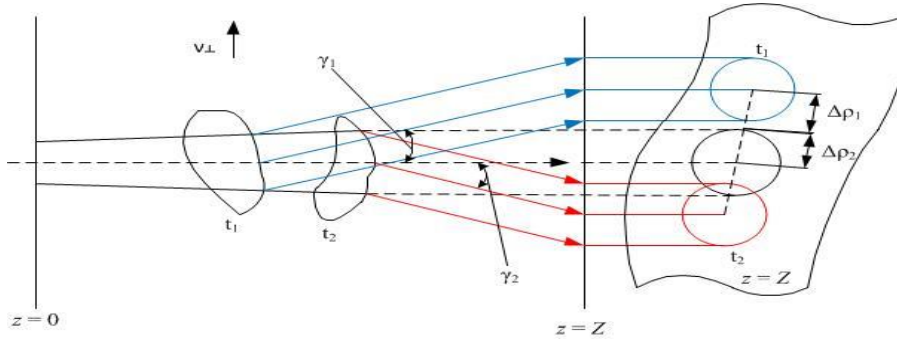
Мощността в апертурата на фотодетектора, която е необходима за подържане на зададената в началото на проектирането вероятност за битова грешка, може да се изчисли с израза:

$$\Phi_{PD} = \frac{1}{2} \left[\frac{SNR^2 C_I e}{R_I} + \left(\left(-\frac{SNR^2 C_I e}{R_I} \right)^2 + \frac{4SNR^2 C_I}{R_I} \left(\frac{2k_B T A}{R_I R_{FB}} + e\Phi_B \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.2.8)$$

С Φ_B се дефинира мощността на фоновото лъчение: $\Phi_B = \pi^2 \tau_r L_{\lambda,B} R_r^2 \theta_r^2 \Delta \lambda_F$.

2.3 Математически модел за определяне на оптималния ъгъл на разходимост на лазерното лъчение при отчитане на външните за приемника шумове

Математически модел за определяне на оптималния ъгъл на разходимост на лазерното лъчение при отчитане на външните за приемника шумове се фокусира върху отчитане на влиянието на едромащабните турбулентни нееднородности, които причиняват флуктуации в посоката на разпространение на лазерното лъчение (фиг. 3.1):



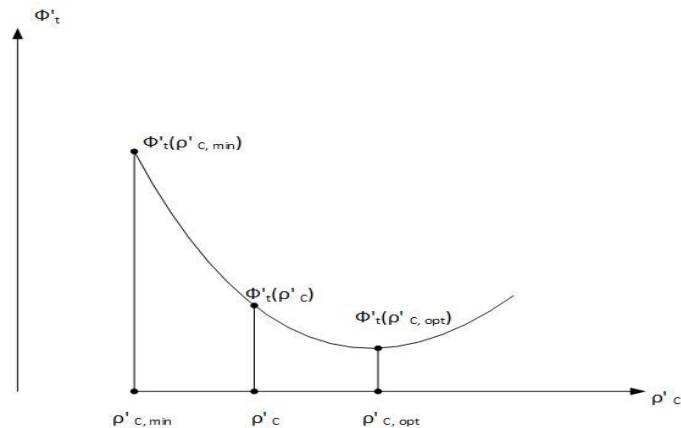
Фигура 2.3. Турбулентни ъглови отмествания на оптични сноп и причинените линейни отклонения в равнината $z = Z$

При наличие на външни шумове отношението сигнал шум намалява в следствие на допълнителното натрупване на флуктуацията на интензитета вследствие на турбулентните нееднородности, флуктуациите в посоката на разпространение на лазерния сноп вследствие на едромащабните турбулентни нееднородности и механичните вибрации. Компенсирането на тези допълнителни (външни) шумови съставки става с изравняването на SNR , отчитащ само вътрешните за приемника шумове и SNR , отчитащ и външните за приемника шумове. **За целта е изведено следното уравнение за компенсация:**

$$A' = (C_I \kappa R_{FB})^2 + \left(2 \frac{R_{RA}^2}{\rho_C^2} \right)^2 \frac{(SR_{FB})^2}{1 - e^{-2 \frac{R_{RA}^2}{\rho_C^2}}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{8\sigma_{\Delta\rho}^2}{\rho_C^2}}} - \frac{1}{1 + \frac{4\sigma_{\Delta\rho}^2}{\rho_C^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{8\sigma_{\Delta\rho}^2}{\rho_C^2}}} - \frac{1}{1 + \frac{4\sigma_{\Delta\rho}^2}{\rho_C^2}} \right) = \frac{S^2 R_{FB}^2}{(SNR)_{INT}} \left[1 - \frac{1}{(x_{max} + 1)^2} \right] \quad (2.3.1)$$

В (2.3.1) x е отношението $x = \frac{\Delta\langle\Phi_{PD}\rangle}{\langle\Phi_{PD}\rangle}$, а x_{max} е ограничение на x , като се съобразим с максимално допустимата мощност във входа на приемника $x_{max} = \frac{\langle\Phi_{PD}\rangle'_{max}}{\langle\Phi_{PD}\rangle} - 1$.

Решавайки (2.3.1) за $x = x_{\max}$ ще бъде намерена функцията $\Phi'_t(\rho'_{C,\min})$ от фиг. 3.2, т.е. ще бъде намерен минималния радиус необходим за компенсацията. Премествайки изменяйки радиуса ρ'_C надясно от $\rho'_{C,\min}$ по абсцисната ос (фиг. 2.4) ще бъде намерена оптималната стойност $\rho'_{C,\text{opt}}$, за която функцията $\Phi'_t = \Phi'_t(\rho'_C)$ има минимум. С това компенсацията е завършена.



Фигура 2.4. Определяне на минималната мощност на оптичния предавател, за компенсиране на $(\sigma_{\text{uEXT}}^2)'$

Достигнато е до следните аналитични изрази за определяне на оптималния ЪРОЛ, отчитайки външните за приемника шумове:

$$\theta' = \frac{\rho'_C - R_{TA}}{Z \sqrt{1 + 15 \left(\frac{R_{TA}}{\rho_{C\varphi}} \right)}}, \quad (2.3.2)$$

където $\rho_{C\varphi} = \left[C_n^2(0) \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right)^2 Z \right]^{-3/5}$.

2.4. Методика за определяне на степента на повишаване на надеждността на работа на оптичната безжична комуникационна система чрез предлагания метод за оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение

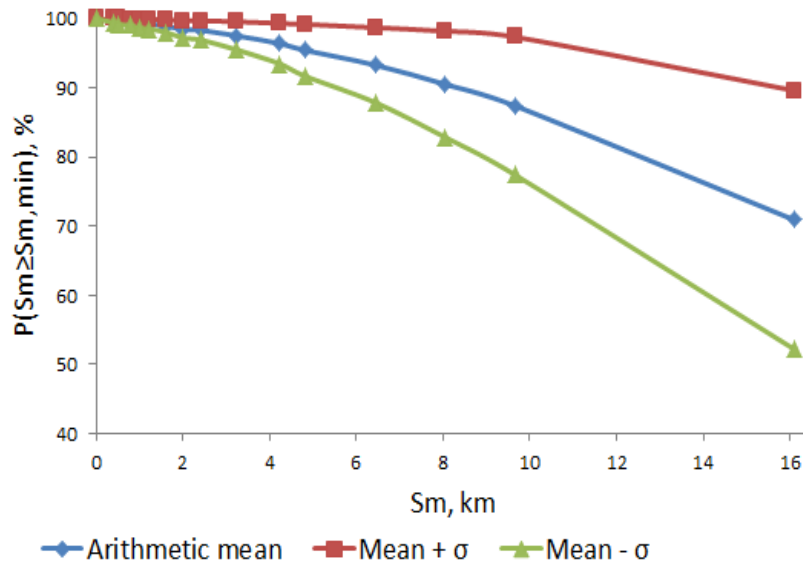
В раздел 2.4 е изведен метод за определяне на степента на повишаване на надеждността на работа на оптичната безжична комуникационна система чрез предлагания метод за оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение. За целта е прието, че случайните флуктуации, които в крайна сметка се свеждат до случайни линейни отмествания на оста на оптичното лъчение от центъра на приемната апертура, могат да бъдат статистически моделирани с Гаусово разпределение:

$$f(\Delta\rho) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\rho}} \exp\left(-\frac{\Delta\rho^2}{2\sigma_{\Delta\rho}^2}\right) \quad (2.4.1)$$

$$F(\Delta\rho) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta\rho}{\sqrt{2}\sigma_{\Delta\rho}} \right) \right] \quad (2.4.2)$$

Изрази (2.4.1) и (2.4.2) са съответно плътността и кумулативната функция за разпределение на вероятностите на нормално разпределение.

Обработени са реални данни от измервания на далечината на видимост в атмосферата, направени в 34 града. Резултатите са представени графично на фиг. 2.5:



Фигура 2.5. Обобщен модел на вероятността за поява на дадена стойност на S_M

Изведени са полиномите, апроксимиращи кривите от фиг. 2.5:

- Mean – σ:

$$P(S_M \geq S_{M,\min}) = 0.00004x^3 - 0.0019x^2 - 0.0077x + 0.9972 \quad (2.4.3)$$

- Arithmetic mean:

$$P(S_M \geq S_{M,\min}) = 0.0000006x^4 - 0.00001x^3 - 0.0007x^2 - 0.0053x + 0.9991 \quad (2.4.4)$$

- Mean + σ:

$$P(S_M \geq S_{M,\min}) = -0.0005x^2 - 0.0016x + 0.9975 \quad (2.4.5)$$

При определянето, чрез предлаганата методика, на надеждността на работа на FSO система се отчита съвместното действие на случайни линейни отклонения от посоката на разпространение на лазерното лъчение и в зависимост от далечината на видимост в атмосферата. Накратко това представлява взаимната вероятност на изпълнението на условията: $\Delta\rho \leq \rho_{\max}$ и $S_M \geq S_{M,\min}$, т.е. $P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min})$.

От теорията на вероятностите и математическата статистика е известно, че вероятността $P(x \geq X)$ или $P(x \leq X)$ представлява интегриране на функцията за плътност на разпределение на

вероятностите в интервала $[X, +\infty)$ или $(-\infty, X]$. Следователно взаимната вероятност $P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min})$ е еквивалентна на:

$$P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min}) = \int_{-\infty}^{\rho_{\max}} \int_{S_{M,\min}}^{+\infty} f(\Delta\rho, S_M) d\Delta\rho dS_M \quad (2.4.6)$$

Тук задачата се свежда до намиране на общата плътност на разпределение $f(\Delta\rho, S_M)$, след като вече са известни двете индивидуални плътности на разпределение $f(\Delta\rho)$ и $f(S_M)$. В общия случай, за да се намери $f(\Delta\rho, S_M)$ е необходимо да се познава зависимостта между случайните величини, които образуват системата $(\Delta\rho, S_M)$. Така нареченият условен закон за разпределение на вероятностите.

В процеса на изследването не бяха открити зависимости между случайните величини $\Delta\rho$ и S_M , следователно израз 2.4.6 може да се запише във вида:

$$P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min}) = \int_{-\infty}^{\rho_{\max}} f(\Delta\rho) d\Delta\rho \int_{S_{M,\min}}^{+\infty} f(S_M) dS_M, \quad (2.4.7)$$

което е еквивалентно на:

$$P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min}) = P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}) P(S_M \geq S_{M,\min}). \quad (2.4.8)$$

След заместване на кумулативната функция на разпределение на случайните флуктуации в посоката на разпространение на лазерния лъч (израз 2.4.2) и вероятността за поява на дадена далечина на видимост (изрази 2.4.3 – 2.4.5) се получава пълният израз за съвместната вероятност:

$$P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min}) = 2(F(\rho_{\max}) - F(0)) P(S_M \geq S_{M,\min}) \quad (2.4.9)$$

Както беше споменато в началото на анализа, надеждността на работа на една оптична безжична комуникационна система представлява съвместната вероятност $P(\Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min})$, т.е.:

$$Availability = P(\rho'_{\max} \leq \Delta\rho \leq \rho_{\max}, S_M \geq S_{M,\min}) \quad (2.4.10)$$

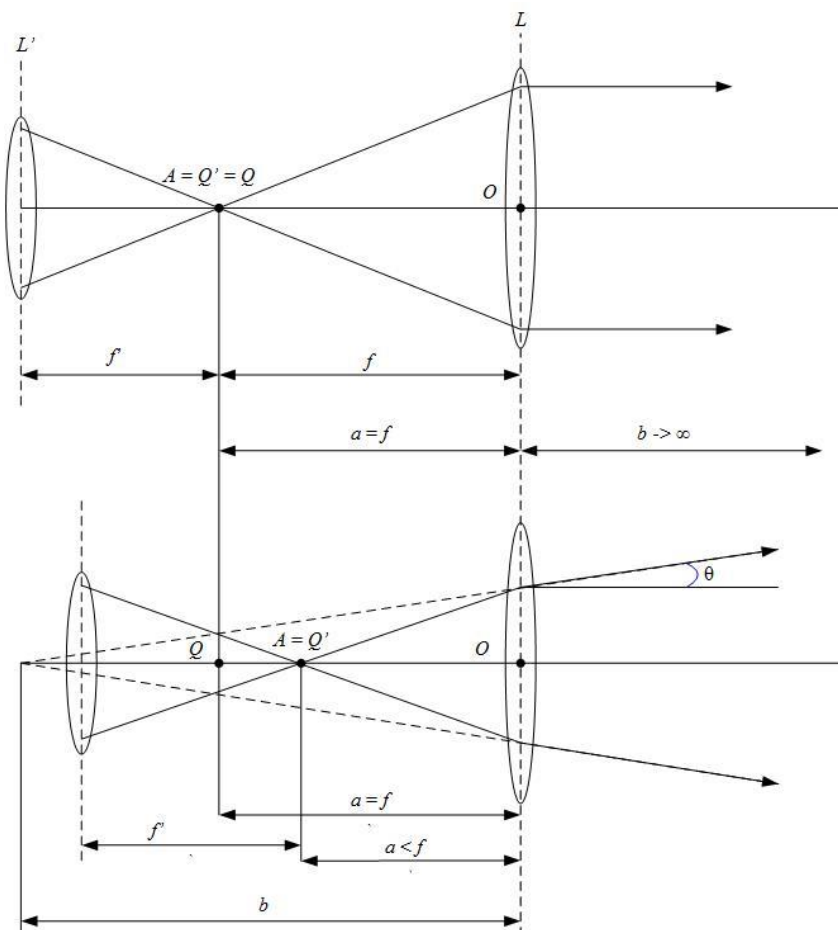
Изведен е крайният израз за определяне на спомената взаимна вероятност и, де факто, **аналитиченият израз за определяне на степента на повишаване на надеждността на работа на оптичната безжична комуникационна система:**

$$Availability = 2(F(\rho_{\max}) - F(0)) P(S_M \geq S_{M,\min}) \quad (2.4.11)$$

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА УСТРОЙСТВО ЗА АПАРАТНА РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПРЕДЛОЖЕНИЯ МЕТОД ЗА ПОВИШАВАНЕ НАДЕЖДНОСТТА НА РАБОТА НА FSO СИСТЕМИ ЧРЕЗ ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЪГЪЛА НА РАЗХОДИМОСТ НА ОПТИЧНОТО ЛЪЧЕНИЕ

В глава 3 е разработено устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване на надеждността на работа на FSO системите чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

За целта са **определени основните принципи** и е изведен израз за отместването на оптичните лещи една спрямо друга, чрез което се постига желан ъгъл на разходимост на оптичното лъчение (фиг. 3.1).



Фигура 3.1. Управление на ъгъла на разходимост

На фиг. 3.3 се забелязва, че когато снопът е колимиран, началният радиус ρ_0 на оптичното лъчение, непосредствено на изхода на леща L е равен на радиуса на лазерния лъч, и намалява, когато L е преместена по-близо до L' . Ако целта е да се постигне още по-голям ъгъл на разходимост, трябва двата оптични елемента да бъдат доближени един до друг, т.е. началният радиус да бъде допълнително намален. Забелязва се връзката: колкото по-голям е ъгълът на разходимост на лазерния лъч, толкова е по-малък неговият начален радиус. **За определянето на описаното отместване е изведен аналитичен израз:**

$$\frac{\rho_0}{X} = \tan(\alpha), \quad (3.1)$$

където X е разстоянието от A (или Q') до обектива L и посредством него може да се пресметне необходимото отместване на лещата.

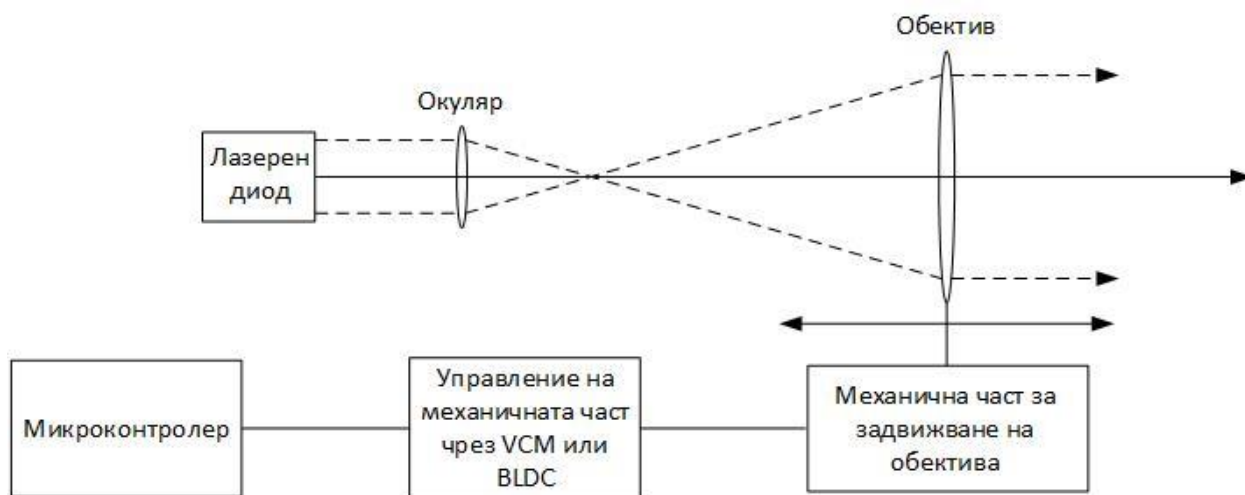
Проведена е симулация (табл. 3.1) с използване управлението на оптичните елементи в предавателната антена за настройване на оптимален ъгъл на разходимост на оптичното лъчение, при което резултатите са сравнени с техническите характеристики на съществуващи оптични системи. Въз основа на анализа на проведената симулация е доказано, че е възможно постигането на адаптивна промяна на ъгъла на разходимост, така че той да има винаги оптимална стойност, с което се обосновава необходимостта от разработване на съответното устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение

Таблица 3.1. Примерни изчисления на отместването на лещите L' и L една спрямо друга

$\theta_{t, \text{opt}}, \text{ mrad}$	$\rho_0, \text{ m}$	$X, \text{ m}$
0.000395	0,0125	0,05
0.0005	0,0099	0,039
1.29	0,0049	0,0197
2	0,0025	0,0098
3	0,00123	0,0066

Основен недостатък на съществуващите адаптивните оптични системи е, че проучванията са съсредоточени в еднократно настройване на оптимален ъгъл на разходимост на лазерния лъч и в последствие се разчита на съвкупността от подвижни огледала да коригират посоката на разпространение на лазерното лъчение. Оптичните предаватели, използващи MEMS елементи, позволяват адаптивна промяна на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение, но такива изследвания все още не са провеждани. Друг недостатък на тези похвати за формиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение е тяхната цена. Както адаптивните оптични системи, така и MEMS елементите са все още прекалено скъпи за комерсиалното им вграждане в FSO. Не на последно място този вид адаптивни оптични терминали използват прекалено сложни и трудни за реализиране алгоритми на работа.

В настоящия дисертационен труд **са предложени и са разработени схемни решения за два варианта на устройство за управление на разходимостта на лазерния лъч при апаратна реализация на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение:** с използване на Voice-Coil Motor (VCM) и с използване на Brushless DC мотор. Примерна блокова схема на предлаганото устройство е показана на фиг. 3.2:



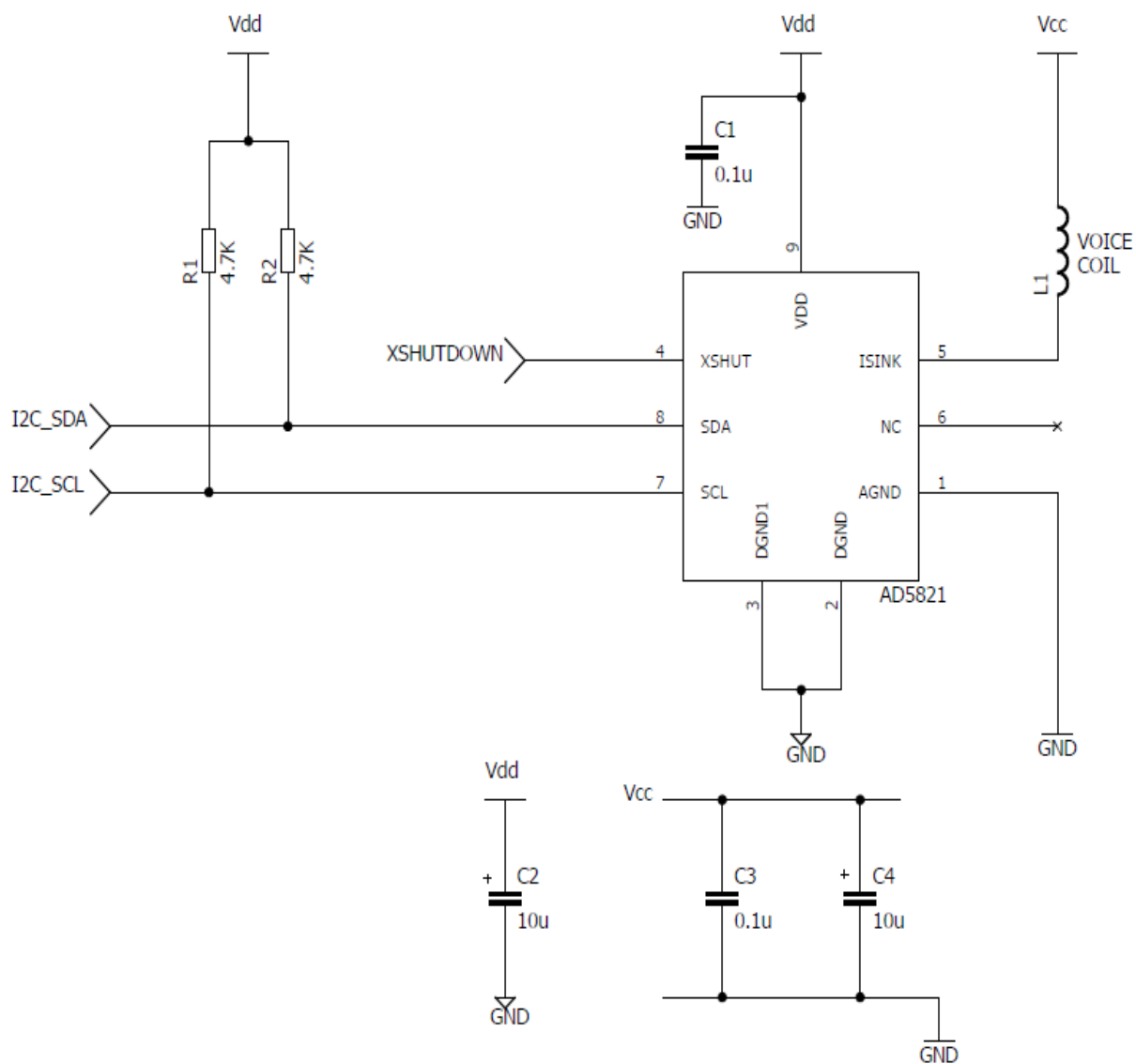
Фигура 3.2. Блокова схема на устройство за управление на ъгъла на разходимост на FSO системи

След проведено проучване на възможностите за управление на лазерното лъчение в FSO системите бе предложено използването на VCM и BLDC тъй като тези две устройства имат следните предимства:

1. По-ниска цена на електро-механичните устройства в сравнение с използването на адаптивни оптични апертури и MEMS.
2. VCM и BLDC моторите се използват за изграждането на адаптивни системи от леци, например обективите на фотоапаратите, камерите на мобилните устройства, оптичните системи на телескопи и др. С други думи те са добре познати и има множество разработени алгоритми и схемни решения за управлението им, които могат да се използват и в FSO.
3. Използват по-опростени хардуерни реализации и алгоритми за управление.
4. Притежават достатъчно добра разделителна способност, за да постигнат необходимите отмествания на лещите, описани в табл. 3.1. При подходящо подбрани алгоритми на управление VCM могат да постигнат до $1\text{ }\mu\text{m}$ стъпка на отместванията, а BLDC до $< 1^\circ$.
5. Имат достатъчно бързодействие (до няколко kHz), за да реагират на промените на прозрачността на атмосферата в канала за връзка.

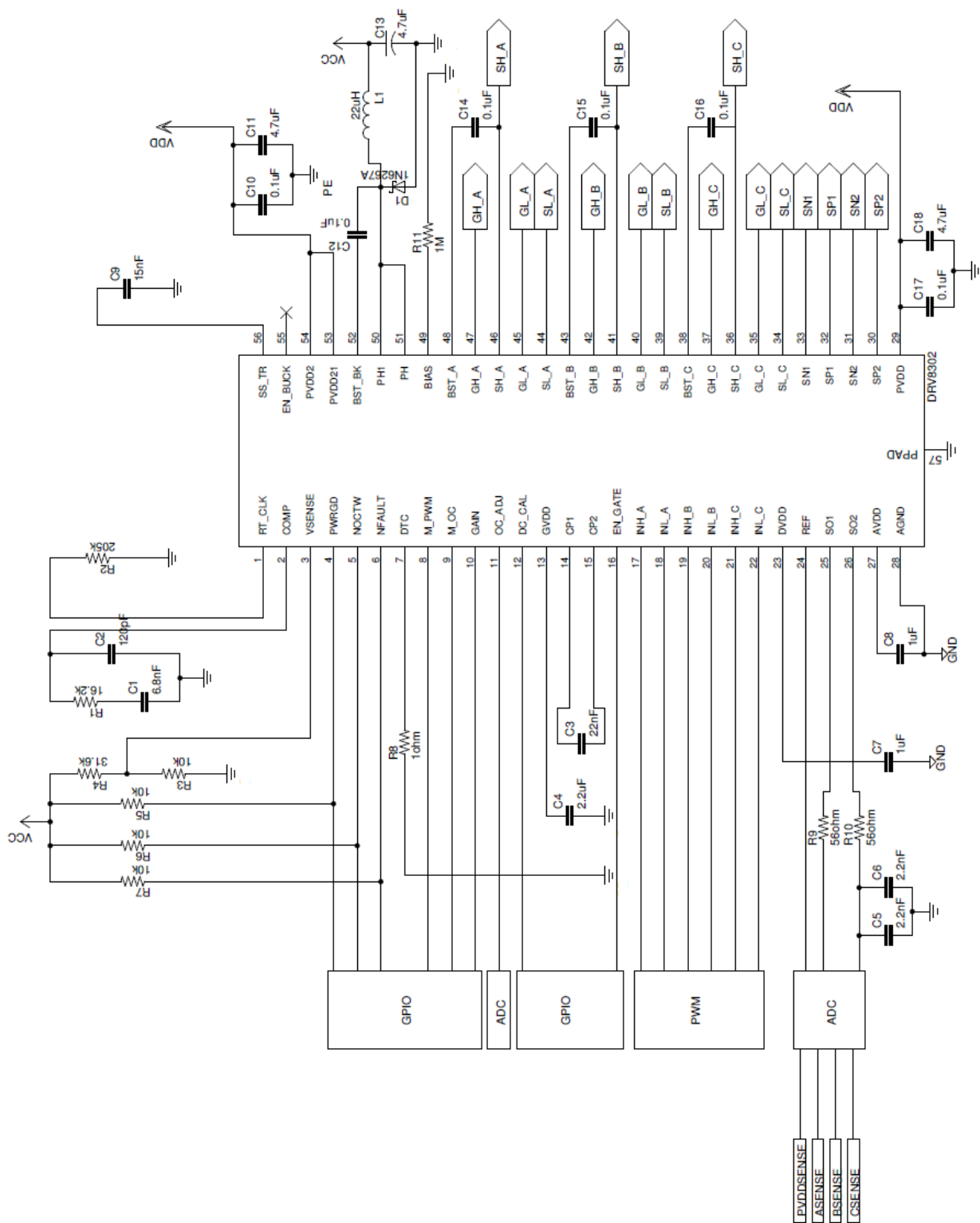
Предложени са и са разработени схемни реализации на адаптивно електро-механично устройство способно да изменя разходимостта на лазерния лъч, в зависимост от атмосферните условия (S_M) с цел повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

Фиг. 3.3 показва реализация на управлението на VCM мотор.

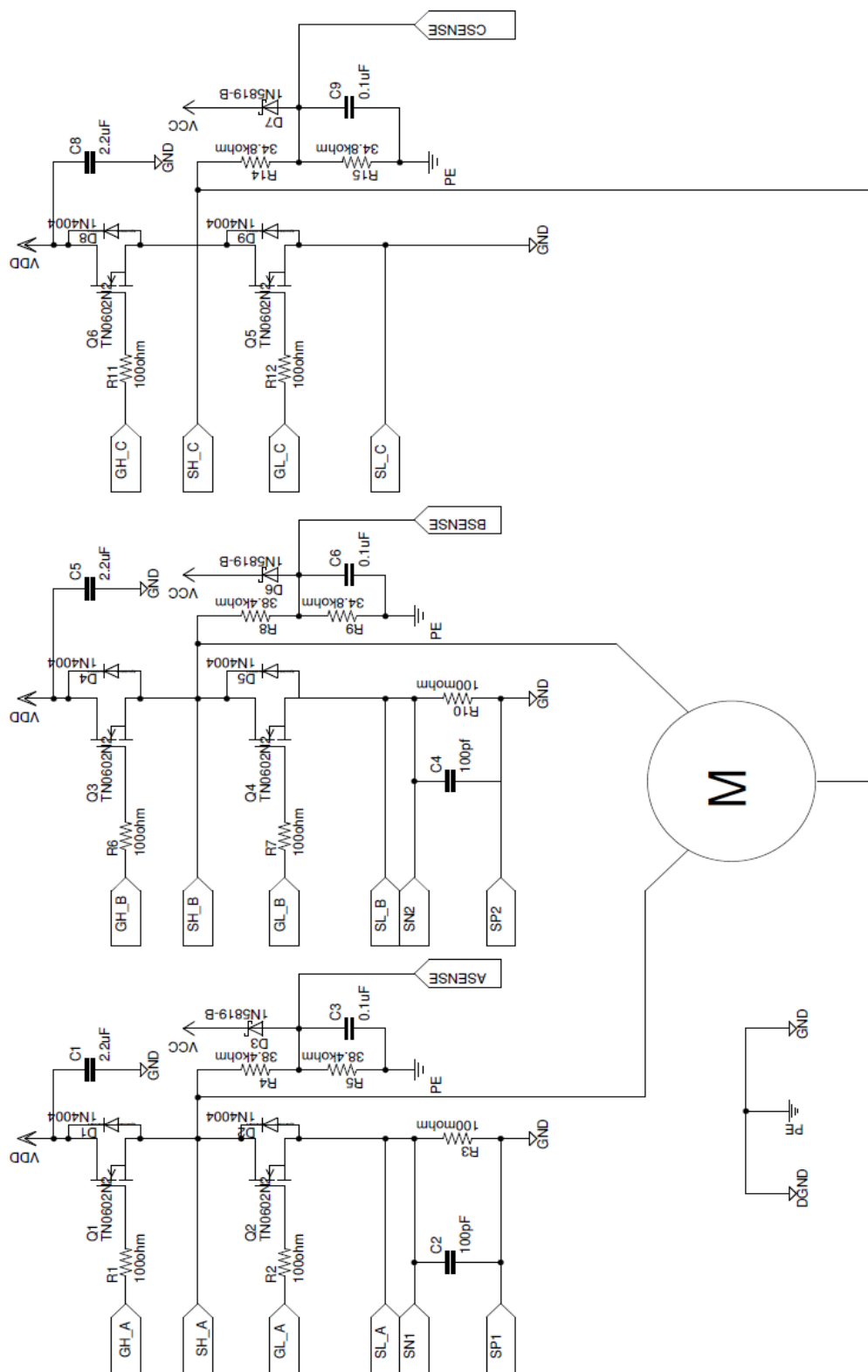


Фигура 3.3. Примерна схема на свързване на VCM контролер

Фиг. 3.4 и фиг. 3.5 показват принципна реализация на схема за контрол на BLDC мотори. За целта е използван DRV8302 и мостова схема от MOSFET транзистори



Фиг. 3.4 Схема на свързване на DRV8302



Фиг. 3.5 Мостова схема за управление на BLDC

ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ СИМУЛАЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ПРЕДЛОЖЕНИЯ МЕТОД ЗА ПОВИШАВАНЕ НАДЕЖНОСТТА НА FSO СИСТЕМИ ЧРЕЗ ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЪГЪЛА НА РАЗХОДИМОСТ НА ОПТИЧНОТО ЛЪЧЕНИЕ

В глава 4 на дисертационния труд са представени числени симулации показващи надеждността на работа на оптична безжична комуникационна система използваща оптимален ъгъл на разходимост на оптичното лъчение. За целта са използвани методиките за пресмятане на оптимален ъгъл на разходимост и надеждност на работа на FSO система предложени в глава 2.

4.1. Дефиниране на необходимите системни параметри при провеждането на експерименталните симулационни изследвания на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение

Използвайки предложената методика в раздел 2.4 ще бъде определена надеждността на работа на FSO система, работеща със следните параметри:

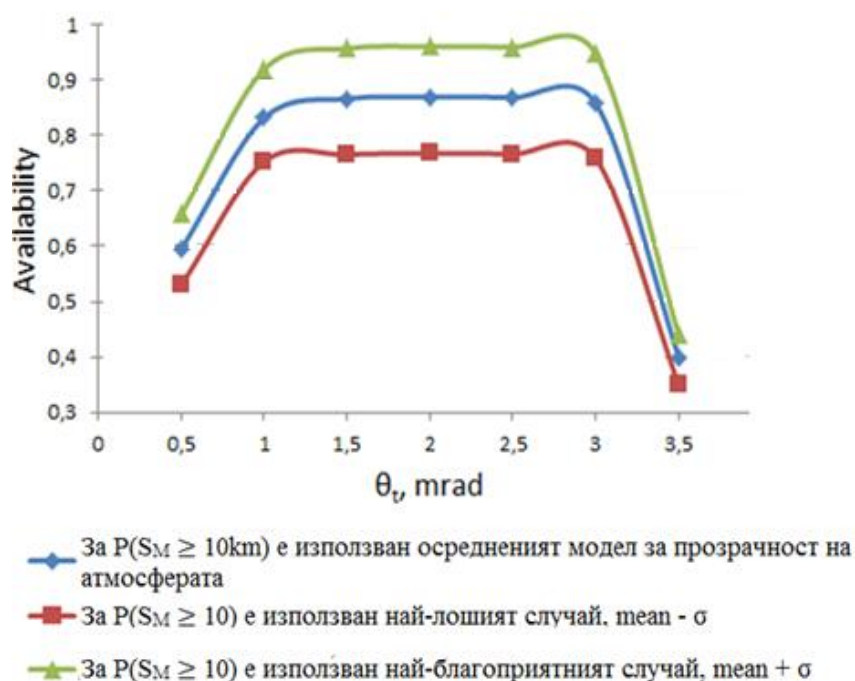
Таблица 4.1 Параметри на FSO системата

Параметър	Стойност
Капацитет на канала, C_i , Mbps	100
Квантова ефективност на фотодетектора, η (λ_0)	0,7
SNR (отговарящо на $BER = 10^{-8}$)	11,2
Централна дължина на вълната, λ_0 , nm	1550
Температура, T , K	300
Константа на приемната апертура, A	5
Съпротивление на обратната връзка на предусилвателя, R_{fb} , k Ω	1
Коефициент на пропускане на предавателната и приемната апертури, $\tau_t = \tau_r$	0,85
Радиус на приемната апертура, R_r , cm	5.5

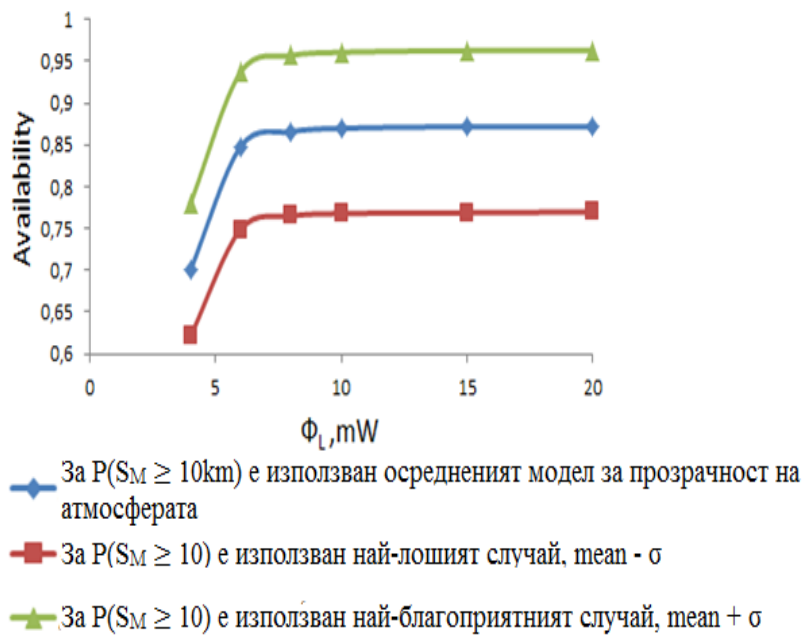
Таблица 4.1 Параметри на FSO системата (продължение)

Параметър	Стойност
Честотна лента на интерфейсия филтър на приемника, $\Delta\lambda_F$, nm	10
Фоново лъчение, $L_{\lambda, \text{в}}$, Å	10^{-2}
Ъгъл на зрение на приемната антена, θ_r , mrad	5

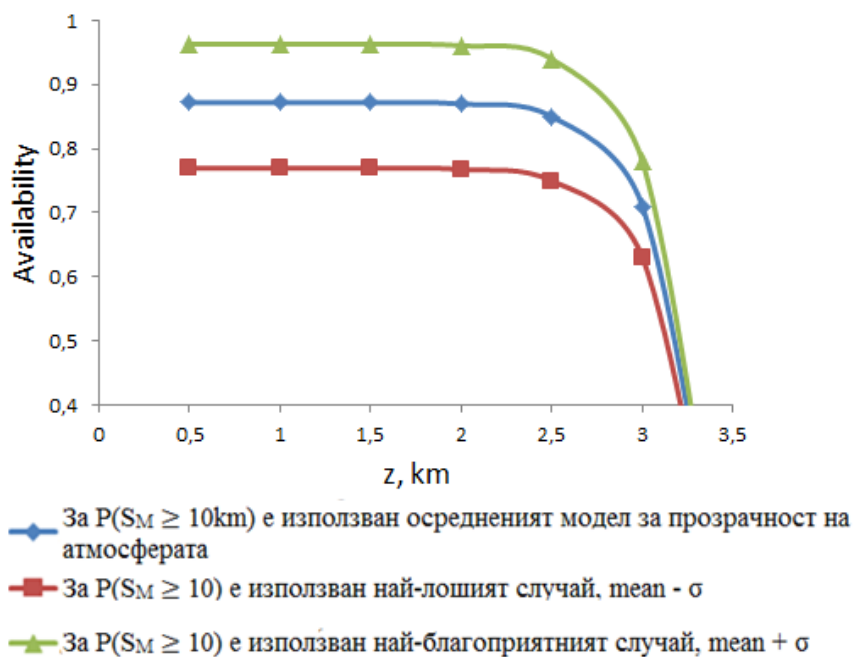
Фигура 4.1 до фиг. 4.3 илюстрират промяната в надеждността на работа на оптична безжична комуникационна система при използването на различни нейни параметри (дължина на трасето z , ъгъл на разходимост на лазерния лъч θ_t и оптична мощност, излъчена от лазерния диод Φ_L). Симулациите са извършени при следните условия: $S_M \geq 10$ km, като за пресмятане на вероятността $P(S_M \geq 10 \text{ km})$ са използвани и трите модела показани във фиг. 2.5 и описани с уравнения (2.4.3) – (2.4.5). За пресмятане на максимално допустимото отклонение $\rho_{\max}$ и надеждността на работа на системата са използвани уравнения (2.2.6) и (2.4.6).



Фиг. 4.1. Надеждност на работа на FSO, при различни стойности на ъгъла на разходимост на лазерното лъчение, $z = 2 \text{ km}$, $\Phi_L = 10 \text{ mW}$



Фигура 4.2. Надеждност на работа на FSO, при използване на различна мощност на предавателя, $z = 2 \text{ km}$, $\theta_t = 2 \text{ mrad}$

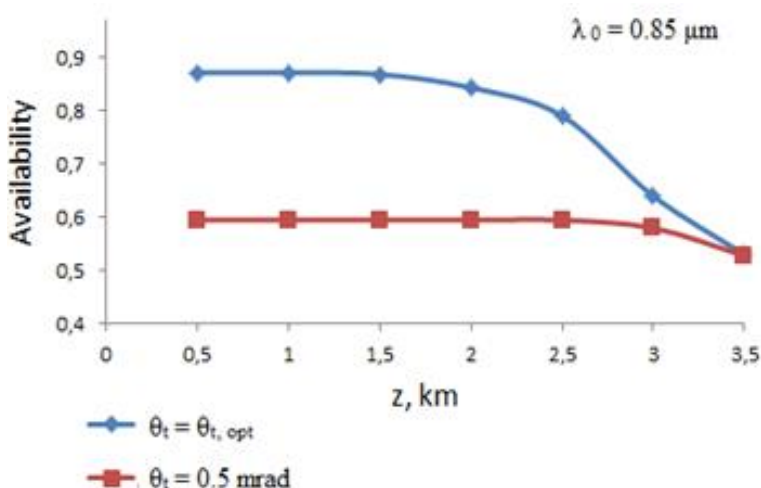


Фигура 4.3. Надеждност на работа на FSO, имаща различни дължини на трасето, $z = 2 \text{ km}$, $\theta_t = 2 \text{ mrad}$

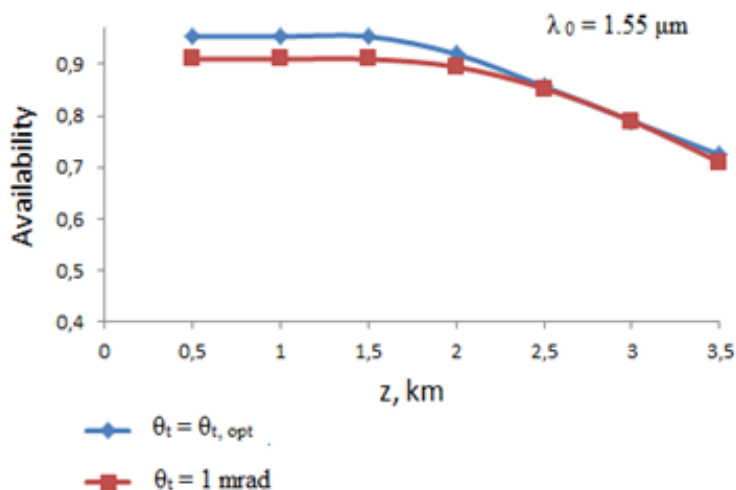
От фигурите се потвърждават теоретичните изводи, че надеждността на работа намалява драстично в екстремните случаи, когато се използват много големи ъгли на разходимост на лазерното лъчение ($\theta_t > 3 \text{ mrad}$) или маломощни оптични източници ($\Phi_L \leq 8 \text{ mW}$). Също така се наблюдава, че, при така поставеното условие $S_M \geq 10 \text{ km}$, в интервалите $\theta_t \in [1,5; 3] \text{ mrad}$, $\Phi_L \in [8; 20] \text{ mW}$ и $z \in [0,5; 2] \text{ km}$, надеждността на работа се променя незначително (от порядъка на 1% до 2%).

4.2. Експериментални симулационни изследвания за определяне степента на повишаване надеждността на FSO система при различни метериологични условия и чрез използване на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение

В раздел 4.2 е изследвана надеждността на работа на две безжични лазерни комуникационни системи. Едната използва винаги оптимален ъгъл на разходимост на лазерното лъчение, т.е. способна е да адаптира ъгъла на разходимост на лазерния лъч в зависимост от външните условия, така, че той да има винаги оптимална стойност. Направени са симулации на работа в случаите, когато е използвана централна дължина на вълната $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ и $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ и $C_1 = 1 \text{ Gbps}$. Наложено е условието $S_M \geq 10 \text{ km}$.



а)

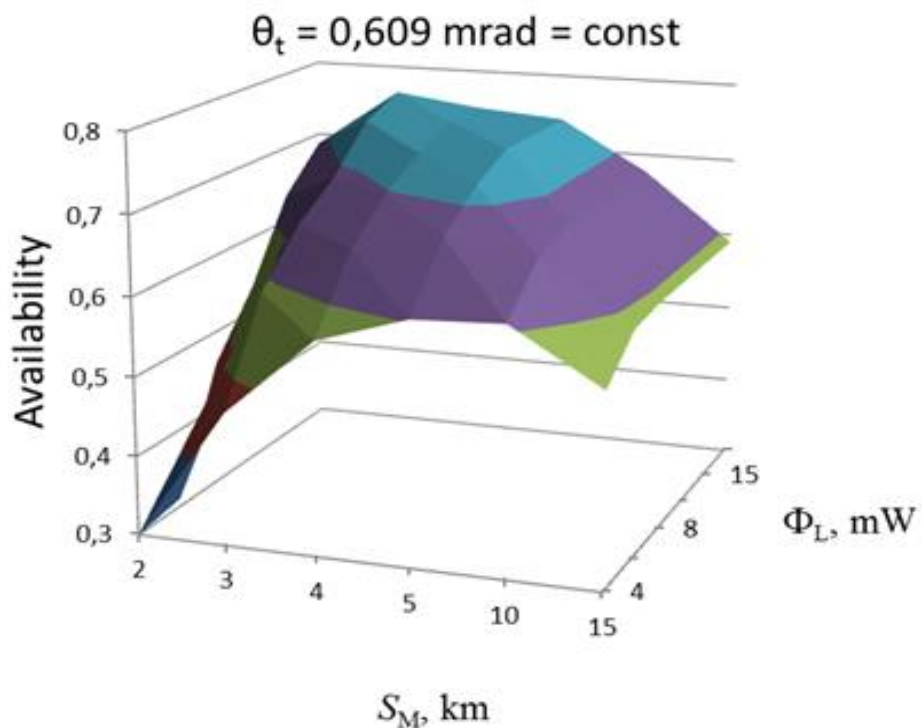


б)

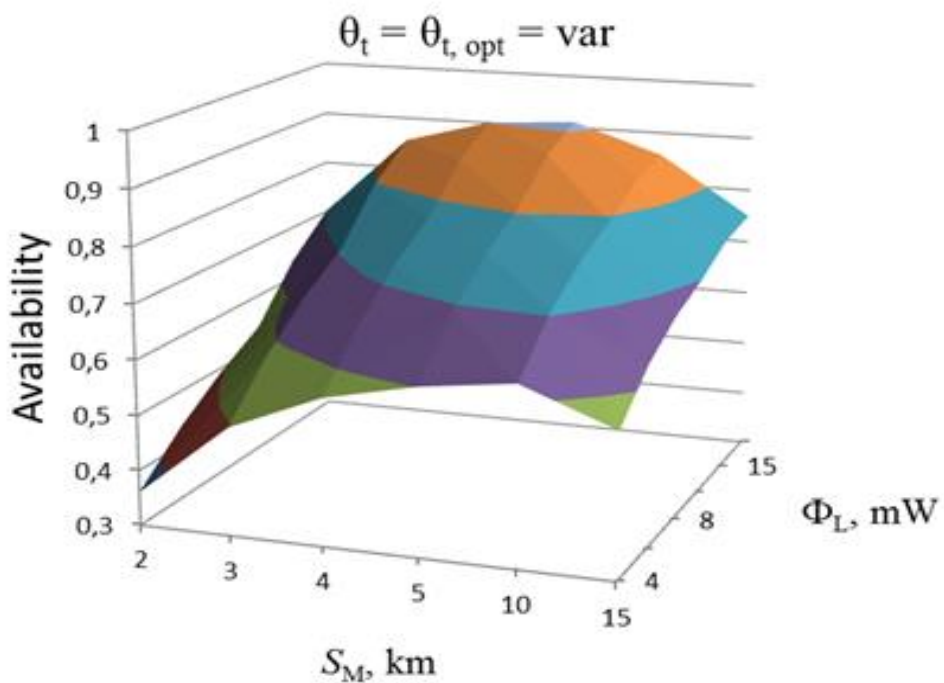
Фигура 4.4. Надеждност на работа на две FSO системи: а) $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$, б) $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ($z = \text{var}$, $\Phi_L = 10 \text{ mW}$)

Фигура 4.5 а) показва процента от време, в което една оптична безжична комуникационна система работи надеждно, използвайки фиксиран ъгъл на разходимост на оптичното лъчение, а фиг. 4.5 б), показва случая, когато FSO използва винаги оптимален ъгъл на

разходимост. Симулацията показва работата на системите при различни метеорологични условия и при използването на различни източници на оптично лъчение. За пресмятане на вероятността $P(S_M \geq S_{M, \min})$, $S_{M, \min} = \text{var}$, е използван осредненият модел от фиг. 2.5.



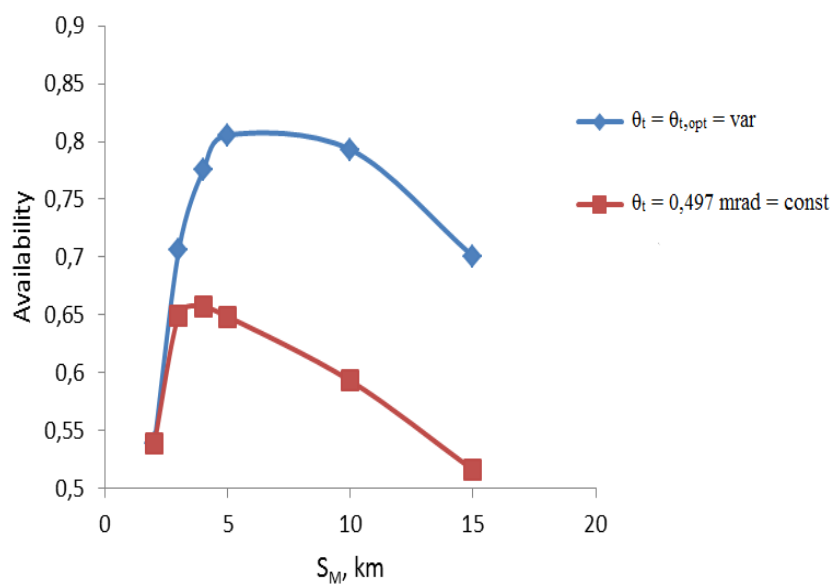
a)



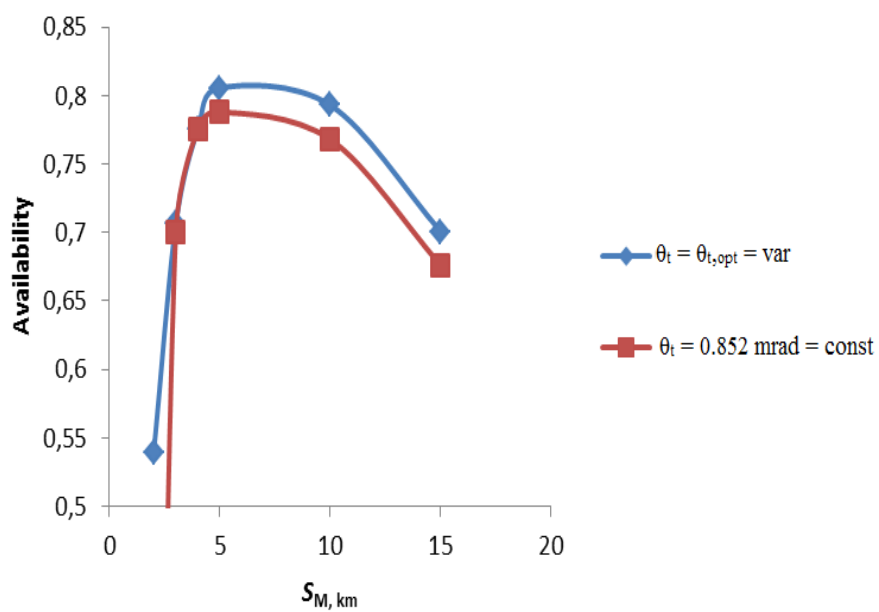
б)

Фигура 4.5. Надеждност на FSO система използваща а) постоянен ъгъл на разходимост и б) оптимален ъгъл на разходимост; $S_M = \text{var}$, $\Phi_L = \text{var}$, $z = 2 \text{ km}$

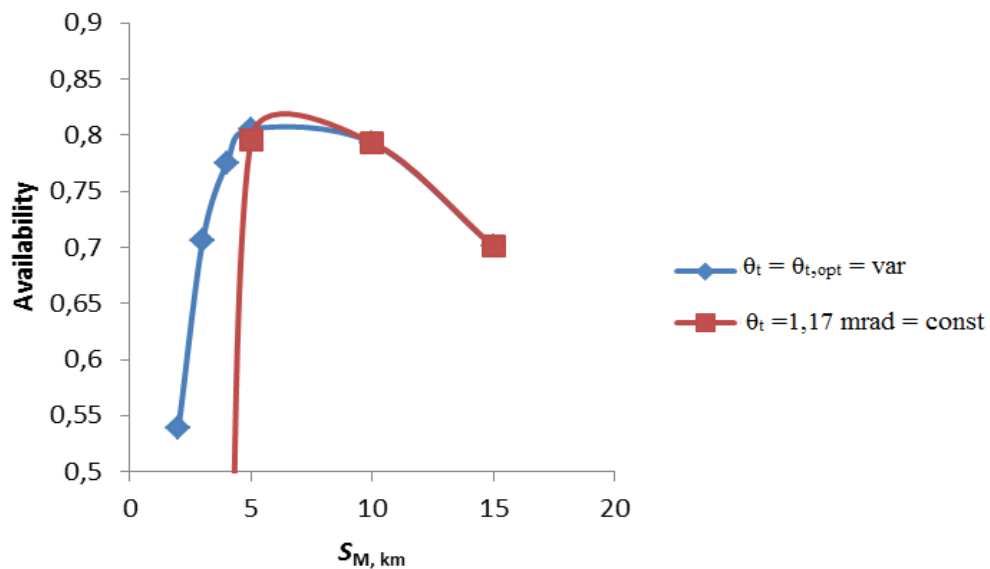
Фиг. 4.6 показва по-нагледни сравнения между двете FSO системи. За да се демонстрира предимството на използване на оптимален ъгъл на разходимост, е сравнена надеждността на работа на FSO използваща различни константни θ_t със система използваща оптимална разходимост на лъчението.



a)



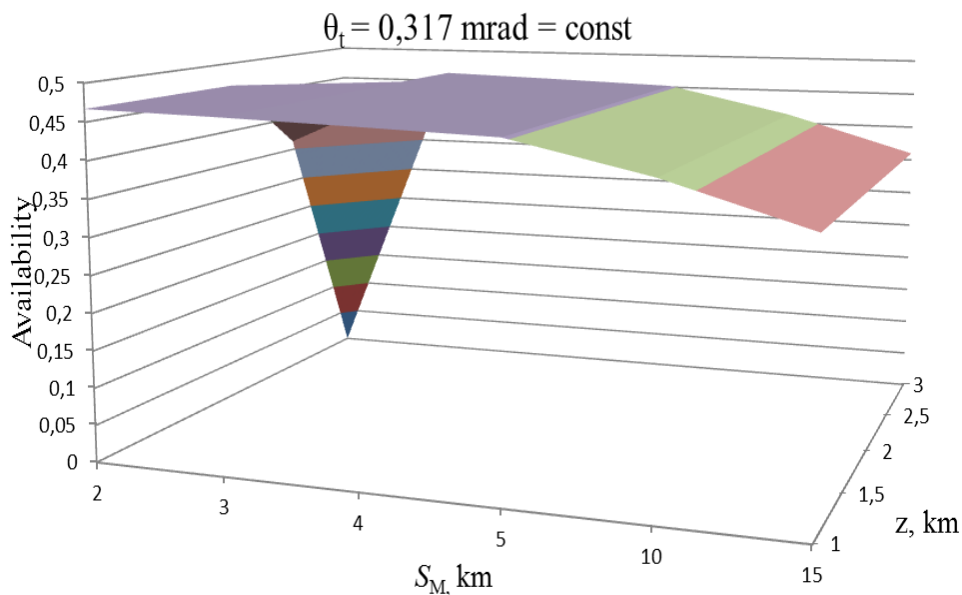
б)



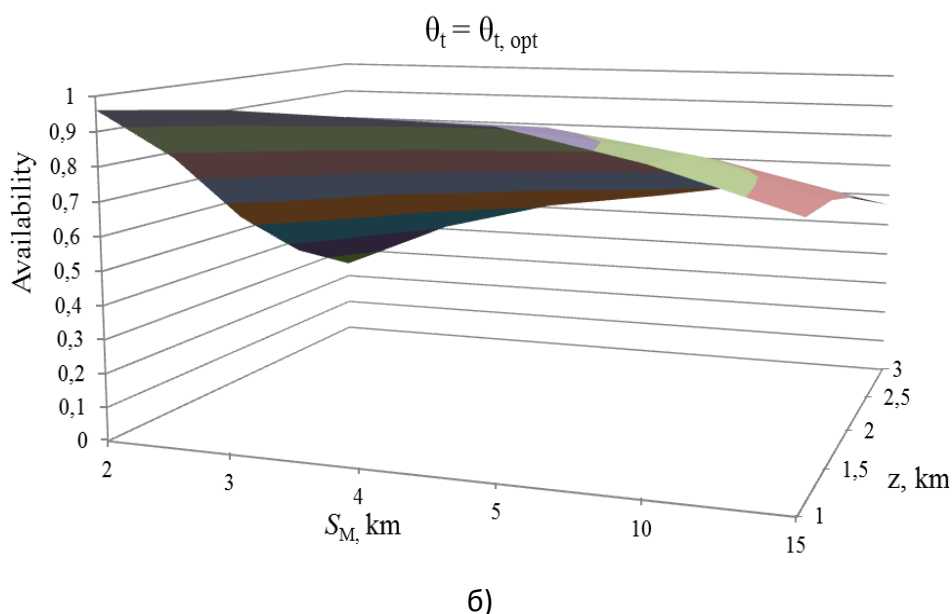
в)

Фигура 4.6. Съпоставка на надеждността на работа на FSO система използваща три различни фиксирани ъгъла θ_t и такава използваща $\theta_t = \theta_{t,opt} = \text{var}$

Фигура 4.7 а) и фиг. 4.7 б) показват промяната на надеждността на работа на FSO система при работата ѝ в различни атмосферни условия и с различни дължини на комуникационния канал. Резултатите потвърждават дотук направените изводи, че безжична лазерна комуникационна система способна да адаптира ъгъла на разходимост, поддържайки постоянно неговата оптимална стойност има висока надеждност на работа в сравнение със система използваща фиксиран θ_t . Най-големи са разликите в надеждността, когато FSO работи в по-екстремни случаи: малка далечина на видимост в атмосферата и голяма дължина на трасето между предавателната и приемните апертури.

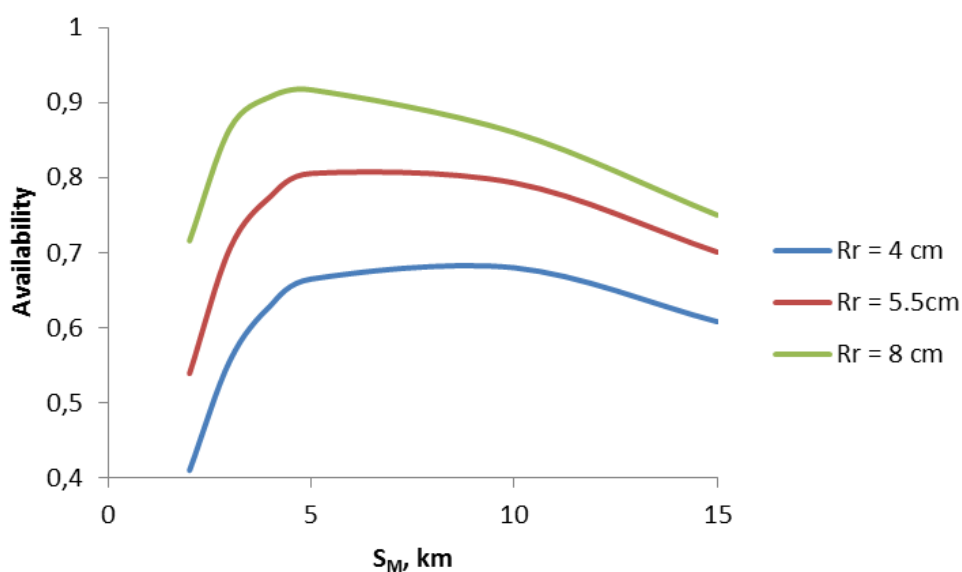


а)



Фигура 4.7. Сравнение на надеждността на работа на FSO система използваща а) константен ъгъл на разходимост и б) оптимален ъгъл на разходимост на лазерния лъч

Симулациите на надеждността на работа на FSO използваща оптимален θ_t и различни радиуси на приемната натена са показани на фиг. 4.8.



4.3. Експериментални симулационни изследвания за определяне степента на повишаване надеждността на мобилна оптична безжична комуникационна система (MFSO) чрез използване на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение

В **раздел 4.3** е изследвана степента на повишаване надеждността на мобилна оптична безжична комуникационна система (MFSO) чрез използване на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на

оптичното лъчение. За целта на изследването, се приема, че комуникационните терминали са монтирани на две подвижни платформи. Постановката е илюстрирана на фиг. 4.9:



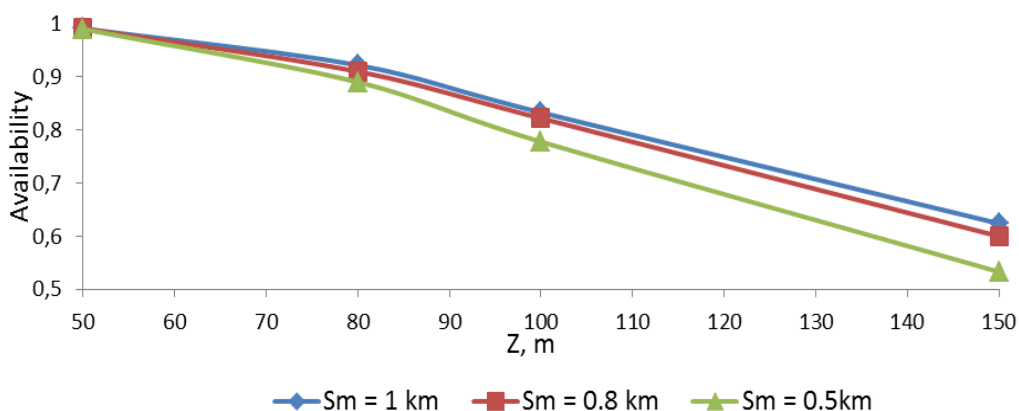
Фигура 4.9. Блокова схема на мобилната оптична безжична комуникационна система

За пресмятането на надеждността на работа на MFSO са използвани следните системни параметри:

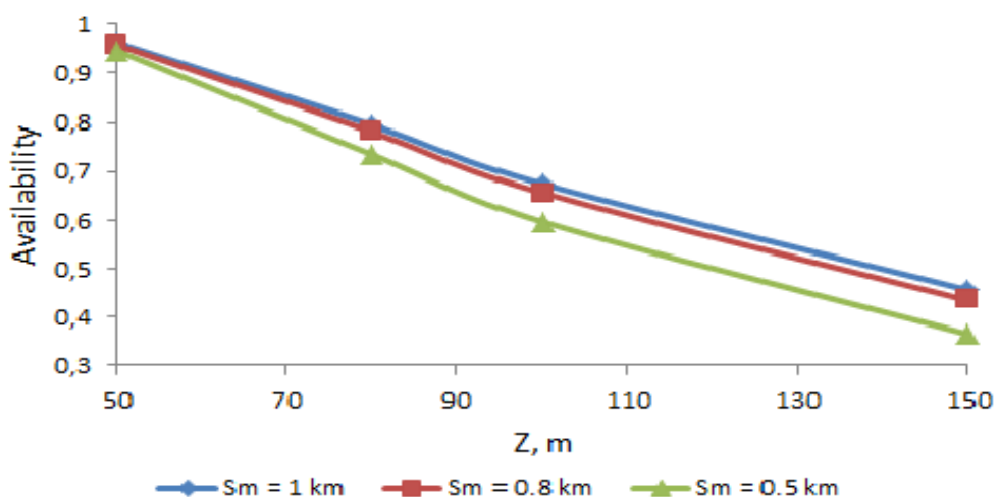
Таблица 4.2. Параметри на мобилната оптична безжична комуникационна система

Параметър	Стойност
Капацитет на канала, C , Mbps	1000
Квантова ефективност на фотодетектора, $\eta_{(\lambda_0)}$	0,7
SNR (отговарящо на $BER = 10^{-8}$)	11,2
Централна дължина на вълната, λ_0 , nm	1550
Температура, T , K	300
Константа на приемната апертура, A	5
Съпротивление на обратната връзка на предусилвателя, R_{fb} , k Ω	1
Коефициент на пропускане на предавателната и приемната апертури, $\tau_t = \tau_r$	0,85
Радиус на приемната апертура, R_r , cm	5,5
Честотна лента на интерфейсия филтър на приемника, $\Delta_{\lambda,F}$, nm	10
Фоново лъчение, $L_{\lambda,B}$, $\text{\AA}$	10^{-2}
Ъгъл на зрение на приемната антена, θ_r , mrad	5
Ъглово отклонение на предавателната антена, γ , mrad	5

Проведени са числени симулации при две централни дължини на вълните $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ и $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$. Вероятността за цифрова грешка, която системата трябва да поддържа е $BER=10^{-8}$, за $P(S_M \geq S_{M, \min})$ е използван осредненият модел за прозрачност на атмосферата (уравнение 2.4.4).



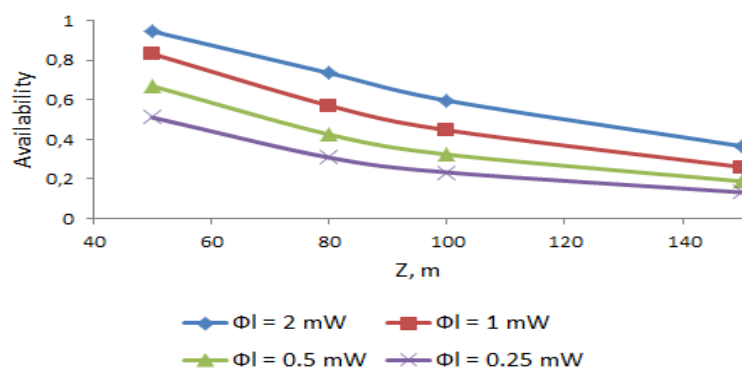
a)



б)

Фигура 4.10. Надеждност на работа на MFSO работеща при различни атмосферни условия и използваща централна дължина на вълната а) $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ и б) $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$

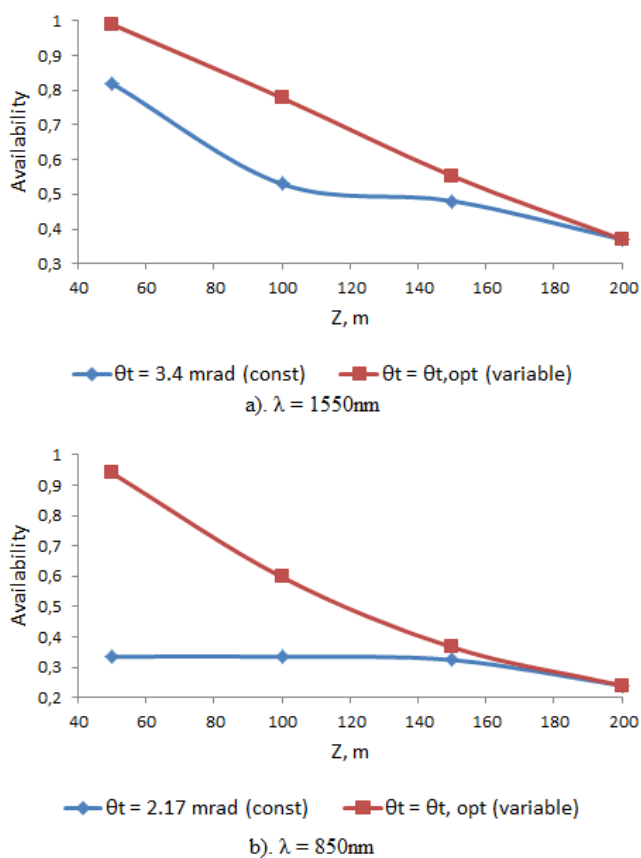
Фиг. 4.10 а) и фиг. 4.10 б) показват промяната на надеждността на работа на MFSO при различните дължини на трасето. Показаната надеждност на работа е постигната с FSO система, поддържаща винаги оптимален ъгъл на разходимост. Числените симулации показват, че така системата работи надеждно (със задоволителна вероятност за цифрова грешка $BER \leq 10^{-8}$) през целия период на експлоатация.



Фигура 4.11. Надеждност на работа на MFSO система, използваща оптимален ъгъл на разходимост и различни по мощност оптични източници, $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$

Фигура 4.12 показва как се изменя надеждността на работа на MFSO, която поддържа винаги оптимален ъгъл θ_t и използва различни оптични източници. Поради невъзможността да се поддържа константно разстояние между терминалите, дължината на атмосферния канал варира в интервала $[50 \text{ m}, 150 \text{ m}]$. За числената симулация е използвана вероятността $P(S_M = 0,5 \text{ km})$,

Фигура 4.12 сравнява надеждността на работа на MFSO, използваща винаги оптимален ъгъл на разходимост и система, работеща с фиксиран ъгъл на разходимост. Симулациите са извършени за $P(S_M \geq 0.5 \text{ km})$, като е използван осредненият модел на далечината на видимост в атмосферата.



Фигура 4.12. Сравнение между MFSO, използваща фиксиран и оптимален ъгъл на разходимост на оптичното лъчение

Наблюдава се значително подобрение в работата на FSO, особено при използването на по-големи честоти на лъчението и при по-малки разстояния между предавателната и приемната апертури. Това отново се дължи на факта, че използването на по-малки ъгли на разходимост не позволяват компенсирането на линейните отмествания между оста на разпространение на лъчението и центъра на приемната апертура, причинени от придвижването на двата комуникационни терминала. От друга страна, използването на по-големи (оптимални) ъгли θ_t , когато разстоянието между приемника и предавателя е по-малко, до голяма степен елиминира грешките в предаването на информация, причинени от случайните флуктуации в посоката на разпространение на оптичното лъчение.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научни приноси:

1. Разработени са методи (раздел 2.2 и раздел 2.3) и са изведени изрази (2.2. 4 и 2.3.2) за определяне оптималния ъгъл на разходимост на оптичното лъчение при отчитане, вътрешните и външни за приемника шумове и всички фактори, влияещи на разпространението на лазерния лъч в атмосферния канал;
2. Разработени са статистически модели, съответно за определяне надеждността на работа на оптична безжична комуникационна система, при наличие на случайни механични вибрации на предавателната антена, в зависимост от далечината на видимост в атмосферния канал и в зависимост от прозрачността на атмосферата (изрази 2.4.3, 2.4.4 и 2.4.5);
3. Разработен е обобщен метод за определяне надеждността на работа на FSO системи и изведеният израз 2.4.6 е приложен при симулационни изследвания.

Научно-приложни приноси:

1. Изведен е израз 3.1 за отместването на оптичните лещи една спрямо друга, чрез което се постига желан ъгъл на разходимост на оптичното лъчение. Дефинирани са конструктивните параметри, необходими при разработването на устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.
2. Проведени са симулационни изследвания (табл. 3.1) с използване управлението на оптичните елементи в предавателната антена за настройване на оптимален ъгъл на разходимост на оптичното лъчение. Резултатите са сравнени с техническите характеристики на съществуващи оптични системи и е доказано, че е възможно постигането на адаптивна промяна на ъгъла на разходимост, така че той да има винаги оптимална стойност. По този начин се обосновава необходимостта от разработване на съответно устройство за апаратна реализация на предложения метод за повишаване надеждността на FSO системи.
3. Предложени са и са разработени схемни реализации на адаптивно електро-механично устройство способно да изменя разходимостта на лазерния лъч, в зависимост от атмосферните условия (S_M) с цел повишаване надеждността на FSO системи чрез оптимизиране на ъгъла на разходимост на оптичното лъчение.

Приложни приноси:

1. Проведени са детайлни симулационни изследвания (раздел 4.1 Табл.4.1 и Фиг.4.1 - Фиг.4.3) за определяне зависимостите между надеждността на работа на оптичната безжична комуникационна система и системните параметри на FSO.
2. Резултатите от симулационните изследвания (раздел 4.2) за определяне надеждността на работа на FSO потвърждават (Фиг.4.6 - Фиг.4.8) направените теоретични изводи в Глава 2 и имат практическа стойност и приложимост. Те доказват, че безжичната лазерна комуникационна система е способна да адаптира ъгъла на разходимост, поддържайки постоянно неговата оптимална стойност и по този начин се постига висока надеждност на работа в сравнение със система използваща фиксиран θ_t .
3. От анализа на представените резултати от експерименталните изследвания (раздел 4.3) за определяне надеждността на работа на мобилна оптична безжична комуникационна система, използваща оптимален ъгъл на разходимост на лазерния лъч се констатира (Фиг.4.12) значително подобрение в работата на FSO при използването на по-малки ъгли на разходимост. При използването на по-големи (оптимални) ъгли θ_t надеждността се повишава до голяма степен вследствие елиминирание на грешките в предаването на информация, причинени от линейни отмествания.
4. Въз основа на проведения задълбочен анализ на извършените експериментални изследвания определено се доказва, че винаги използването на предложения оптимален ъгъл $\theta_{t,opt}$ (израз 2.2.4) подобрява надеждността на работа на FSO системата от 10% до 20%.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Y. Kovachev, Ts. Mitsev, "Trends in Increasing the Channel Capacity of FSO Systems", Annual ICEST Conference, 26-28 June, 2013, Ohrid, Macedonia
2. Ts. Mitsev, Y. Kovachev, "Electronic Device for Controlling the Laser Beam Divergence in FSO Systems", XXI NATIONAL CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION TELECOM 2013, October 18th, 2013
3. Ts. Mitsev, Y. Kovachev, "FSO Availability Depending on the Meteorological Conditions", 9th International Conference on Communications, Electromagnetism and Medical Applications (CEMA `14), October 16th, 2014
4. Ts. Mitsev, Y. Kovachev, "Availability of MFSO Using Optimal System Parameters", Microwave and Radio Electronics Week 2015 (MAREW 2015), April 23rd, 2015

5. Y. Kovachev, "Availability of FSO System in the Presence of Random Jitter in the Initial Beam Direction", XXIII NATIONAL CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION TELECOM 2015, October 16th, 2015
6. Ts. Mitsev, Y. Kovachev, "Availability of Free-Space Optical Systems Depending on Atmospheric Conditions and System Parameters", International Journal of Wireless Communications and Network Technologies, Volume 5, No.3, pp 21-27, April – May 2016
7. Yordan Kovachev, Tsvetan Mitsev, "Methodology for Calculation of the Outage Probability of a Free-Space Optical Communication System in the Presence of Atmospheric Turbulence", 52TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION, COMMUNICATION AND ENERGY SYSTEMS AND TECHNOLOGIES ICEST2017, June 28th, 2017, Nis, Serbia
8. Yordan Kovachev, Tsvetan Mitsev, "A Brief Survey of the Methods for Increasing FSO Availability", Journal of Science, Innovative Technology and Informatics – IN-SILLICO INTELLECT, Vol. 1 , No. 1, pp 41-44

SUMMARY

Investigation of the functional parameters of FSO system depending on the laser beam divergence

Author: Msc. Eng. Yordan Kovachev,

In recent years, the FSO systems have become an attractive "last-mile" or "last-kilometer" solution in the communication networks. They combine the channel capacity of optical fiber links and the advantages of the wireless technologies.

The main disadvantage of FSO systems is their availability. It is difficult to predict the availability of FSO systems, because of the various random factors influencing the laser beam propagation through the atmosphere. There are various studies that focus on dealing with the fading in the communication channel caused by small turbulent eddies. It is important to state that there are very few studies on the effects caused by the random fluctuations in the optical beam direction caused by large turbulent eddies or random mechanical vibrations. There are also very little research papers on the dependence of the functional parameters of FSO system (especially their availability) on the laser beam divergence angle, which justifies the need for further theoretical and experimental research on this area.

The aim of the dissertation is to develop a method for increasing FSO availability using optimal beam divergence angle and to propose the realization of this method using a device capable of keeping always optimal value of the beam divergence angle.

For the purpose, a methodology for calculating the optimal beam divergence angle was created. In this methodology, both the external and internal noises to the receiver were taken into account. Using real data, a statistical model of the atmospheric visibility was created. A method for calculating the FSO availability was developed, which takes into account the random fluctuations in the initial direction of the optical beam.

Two variants for realization of a device capable of always keeping the laser beam divergence angle to its optimal value was proposed, using voice-coil motors and brushless dc motors.

Experimental simulations were performed to evaluate the availability of FSO system, which is capable of always using optimal beam divergence angle. The results were compared to the availability of an FSO system using fixed beam divergence angle. Simulations were done for different atmospheric conditions and system parameters. Simulations were performed for mobile and stationary FSO systems. After analyzing the results, it was observed that the availability of FSO system using always optimal beam divergence angle is 10% to 20% more reliable than the FSO system using a fixed beam divergence angle.