

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИЕМНИКА АТМОСФЕРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Е. А. Решетняк, А. А. Решетняк, В. В. Черников, И. Г. Нафиев (Воронеж)

В современных телекоммуникационных системах, в условиях постоянно возрастающего дефицита частотного ресурса, ужесточающихся требований к электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, все большая роль отводится лазерным атмосферным линиям связи. К их несомненным достоинствам относятся большая пропускная способность, дешевизна, легкость развертывания и, что наиболее существенно в случае необходимости организации скрытной линии связи, высокая разведзащищенность. До настоящего времени разведзащищенность атмосферных лазерных линий связи предполагалась практически абсолютной [1]. Однако совершенствование элементной базы, которое привело к созданию новых высокочувствительных приемников лазерного излучения, а также появление систем технических разведок лазерных излучений на основе методов искусственного интеллекта ставит под вопрос такие преимущества лазерных атмосферных линий связи, как высокая разведзащищенность и скрытность связи.

Оценка данных параметров требует построения адекватной исследовательской имитационной модели, в основе разработки которой должны лежать взаимосвязанные логико-математические модели канала распространения и приемника лазерных излучений. Целью данной работы, является рассмотрение основных этапов построения исследовательской имитационной модели приемника лазерных излучений лазерных атмосферных линий связи.

Исследовательская имитационная модель приемника лазерных излучений представляет собой численный метод проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ с логико-математическими моделями, имитирующими поведение канала распространения и приемника лазерных излучений во времени в течение заданного периода. Исходя из анализа известной литературы [2], независимо от выбранного способа описания и обобщения внешних и внутренних параметров исследуемой системы (приемника лазерного излучения), создание имитационной модели проходит следующие этапы.

1. Описание объекта моделирования. Определение перечня количественных показателей эффективности системы, оцениваемых при моделировании. Внесение в модель основных ограничений.

2. Создание содержательной модели, охватывающей структуру моделируемой системы, а также логические связи ее связующих элементов, необходимые для достижения цели моделирования.

3. Формализация системы, подбор типовых логико-математических схем, описывающих поведение отдельных элементов системы и их взаимодействие.

4. Реализация и отладка программных модулей модели. Использование программного обеспечения для имитационного моделирования сложных систем и процессов.

5. Проверка адекватности модели.

6. Организация и оптимизация модельного эксперимента.

7. Анализ и верификация результатов моделирования.

В контексте данной работы кратко рассмотрим основные этапы создания исследовательской имитационной модели приемника лазерных излучений – со второго по пятый.

Содержательная модель приемника лазерных излучений и канала распространения лазерного излучения

Основная отличительная особенность функционирования приемника лазерных излучений – состояние априорной неопределенности относительно параметров разведываемого лазерного излучения. В данных условиях наиболее широко используются приемники, построенные на основе прямого квадратического детектирования.

Структурная схема такого приемника состоит из приемной оптической системы, применяемой для фокусировки входного электромагнитного поля оптического диапазона, фотодетектора, усилителя и блока обработки полученного сигнала. Влияние приемной оптической системы подробно рассмотрено в [3].

Входное поле $f_r(\vec{r}_a, t)$ преобразуется оптической системой в принимаемое поле $f_d(\vec{r}_d, t)$ и поступает на фотодетектор. В качестве фотодетектора может выступать электровакуумный детектор, pin фотодиод, лавинный фотодиод, также детектор на основе фотоумножителя. Наиболее широко применяются в настоящее время полупроводниковые фотодетекторы (на базе pin и лавинных диодов). Типичные характеристики фотодетекторов – квантовая эффективность фоточувствительной поверхности, чувствительность детектора, полоса пропускания и темновой ток [3]. Квантовая эффективность η определяется как отношение мощности детектированного поля к мощности падающего поля. Этот параметр является количественной характеристикой потенциальной возможности фоточувствительной поверхности к детектированию потока мощности падающего поля путем ее преобразования в электрический ток. Чувствительность детектора u определяется как отношение выходного тока детектора к мощности падающего поля. С помощью чувствительности определяется нормализованная суммарная интенсивность поля [3]:

$$n(t) = \bar{G}u \int_{A_d} |f_d(\vec{r}, t)|^2 d^2\vec{r}, \quad (1)$$

где \bar{G} – усредненный коэффициент усиления фотодетектора; u – чувствительность; $|f_d(\vec{r}, t)|^2 = I_d(\vec{r}, t)$ – интенсивность поля на поверхности детектора A_d . Принимаемую мощность можно обозначить как [3]:

$$P_r = \int_{A_r} |f_r(\vec{r}, t)|^2 d^2\vec{r} = \int_{A_r} |f_r(\vec{r}, t)|^2 d^2\vec{r}, \quad (2)$$

где A_r – приемная апертура.

Отношение сигнал/шум может быть выражено следующим образом [1]:

$$N_s = \frac{P_r^2 \lambda^2 \eta}{2h^2 c^2 \Delta F \left[\frac{P_r \lambda}{hc} \bar{G}^{n-2} + \frac{I_{dc} \bar{G}^{n-2}}{q\eta} + \frac{4k_0 (T_0 + T_n)}{q^2 \eta \bar{G}^2 R_d G_p} \right]}, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучения; h – постоянная Планка; ΔF – эффективное значение полосы пропускания; n – параметр, зависящий от соотношения коэффициентов ионизации электронов и дырок; q – заряд электрона; k_0 – постоянная Больцмана; T_0 – реальная температура нагрузки; T_n – шумовая температура усилителя; R_d – дифференциальное сопротивление диода; G_p – коэффициент преобразования мощности.

Для определения логической связи характеристик математической модели приемника лазерного излучения и параметров атмосферного канала распространения лазерного излучения требуется аналитически описать их логико-математическую взаимосвязь.

Специфика распространения лазерного оптического излучения заключается в том, что оно испытывает ослабления и рассеяния в процессе распространения по каналу передачи. В случае применения атмосферной линии передачи наибольшие влияния оказывают на излучение различные атмосферные образования типа турбулентностей и аэрозолей (туман, смог, дым). Также при расчете лазерных линий необходимо учитывать воздействие осадков.

В случае рассеяния аэрозолями удобно воспользоваться подходом, описанным в [5], согласно которому суммарное поле, рассеянное N частицами, представляется в виде

$$E_s(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^N A[\Omega_i(t)] \exp\left(i\left[\vec{k}_i, \vec{r}_i(t) - \nu_0 t\right]\right), \quad (4)$$

где $A[\Omega_i(t)]$ – комплексная амплитуда волны, рассеянная i -той частицей; ν_0 – частота падающей волны; $\vec{r}_i(t)$ – зависящая от времени координата i -го рассеивателя; $\Omega_i(t)$ – углы Эйлера.

В предположении, что лазерное излучение является монохроматическим, удобно воспользоваться методикой для расчета ослабления, вносимого аэрозолями, изложенной в [6]. Согласно этой методике, поток оптического монохроматического излучения, распространяясь по трассе длиной L , испытывает ослабление согласно следующей формуле:

$$\Phi_\lambda(L) = \Phi_\lambda(0) \exp(-\alpha_\lambda L), \quad (5)$$

где Φ_λ – поток монохроматического излучения; λ – длина волны. После введения функции распределения частиц по размерам $f(x)$ формула для расчета коэффициента ослабления может быть выражена следующим образом [6]:

$$\alpha_a = N \int_0^\infty k_a(r, \lambda) f(r) dr, \quad (6)$$

где $k_a = k_s + k_a$ – коэффициент ослабления излучения отдельной частицы; k_s – коэффициент ослабления отдельной частицы, вызванного рассеянием; k_a – коэффициент ослабления отдельной частицы, вызванного поглощением; N – плотность частиц, r_c – средний радиус частиц. Для водяных капель применима формула [6]:

$$\alpha_{ap} = 2N\pi r_c^2 f(\rho). \quad (7)$$

Также существенным фактором, оказывающим влияние на распространение лазерного излучения в атмосфере является турбулентность. Лазерный луч, распространяясь в такой среде, испытывает случайные колебания интенсивности, ширины и угла прихода [5]. Ширина пучка в определенный момент времени определяется с помощью мгновенного радиуса пучка [7]:

$$R_m^2 = \Phi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\vec{r} - \vec{r}_c)^2 I(L, \vec{r}) d^2\vec{r}, \quad (8)$$

где $\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(L, \vec{r}) d^2 \vec{r}$ – мощность пучка; $\vec{r}_c = \Phi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{r} I(L, r) d^2 \vec{r}$ – координата энергетического центра пучка; L – длина трассы распространения. Усредненное во времени состояние лазерного пучка описывается эффективным радиусом пучка [7]:

$$R_e^2 = \Phi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(L, \vec{r}) \rangle \vec{r}^2 d^2 \vec{r}, \quad (9)$$

где $\langle I(L, \vec{r}) \rangle$ – усредненная интенсивность лазерного излучения. В большинстве практически значимых случаев, для расчета усредненной интенсивности пучка целесообразно воспользоваться эмпирической формулой [7]:

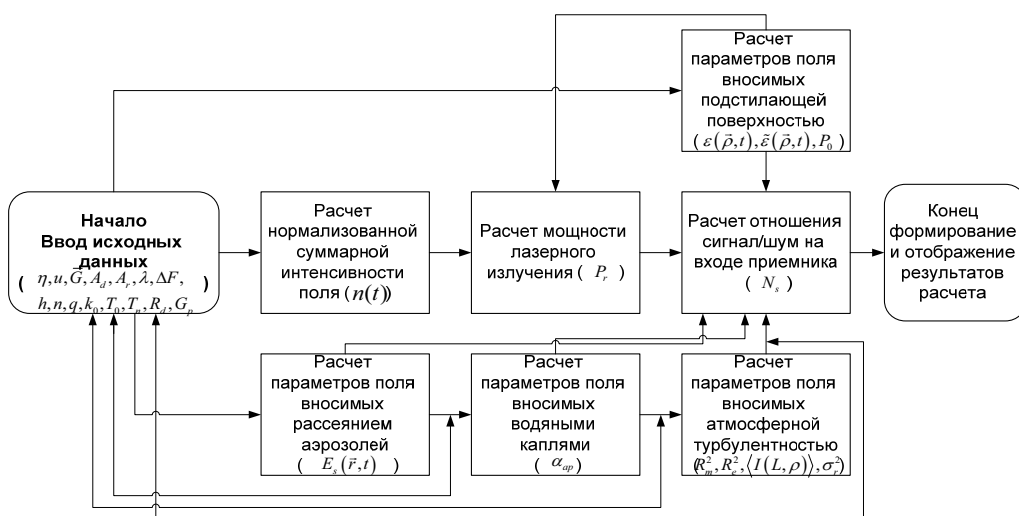
$$\langle I(L, \rho) \rangle = I_0 \int_0^{\infty} J_0 \left(2\rho \frac{t^{1/2}}{a} \right) \exp \left(-t - \frac{1}{2} \mu t^{5/6} \right) dt, \quad (10)$$

где I_0 – интенсивность на оси пучка; J_0 – функция Бесселя $\mu = 1.1 C_n^2 k^2 L \left(\frac{2L}{ka_d} \right)^{5/3}$; C_n^2 –

структурная постоянная показателя преломления воздуха, характеризует величину его турбулентных неоднородностей, изменяющихся во времени; k – волновое число; $a_d = a \left(\Omega^2 + (1-f)^2 \right)^{1/2}$ – дифракционный радиус пучка лазерного излучения; $\Omega = ka^2/L$ – число Френеля; f – параметр фокусировки. Помимо изменения интенсивности, лазерный луч испытывает также колебания центра пучка, которые без учета влияния дифракционного турбулентного описываются следующей формулой:

$$\sigma_r^2 = 1.36 C_n^2 L^3 a^{-1/3}. \quad (11)$$

Блок-схема, описывающая поведение и взаимодействие показателей математических моделей приемника лазерного излучения и атмосферного канала распространения лазерного излучения, приведена на рисунке.



Блок-схема алгоритма расчета основных показателей исследовательской имитационной модели приемника лазерных излучений атмосферных линий связи

Для программной реализации алгоритма используется интегрированная среда имитационного моделирования AnyLogic, которая в настоящий момент удовлетворяет всем требованиям к построению исследовательских имитационных моделей. Путем применения методов и библиотек системной динамики данного программного продукта создается (из набора абстрактных элементов – уровней, потоков, функций решений показателей математических моделей, вспомогательных переменных и т.д.) системно-динамическая имитационная модель, обладающая заданными свойствами, определенными в концептуальном описании модели.

Отладка (тестирование) программных модулей в составе модели выполняется с использованием тестовых данных, на основе которых ранее были проведены (ручным способом) аналитические расчеты по формулам (1)–(3), (6)–(8), (10), (11). При совпадении результатов аналитических расчетов с модельными, модель считается адекватной и реально отражающей заданные свойства при моделировании.

Выводы

Рассмотрены основные этапы разработки исследовательской имитационной модели приемника лазерных излучений при распространении сигнала в турбулентной атмосфере, а также при рассеянии на аэрозолях. Реализация данной модели позволяет проводить научно-исследовательские эксперименты для анализа и синтеза параметров разведзащищенности и скрытности лазерных линий связи с учетом изучения свойств атмосферных каналов распространения лазерного излучения, а также оптимизации характеристик приемника лазерного излучения, построенного по принципу прямого детектирования.

Литература

1. **Дубинкин В. А., Павлов Р. В., Толстых Н. Н.** Математическая модель лазерной атмосферной линии связи // Теория и техника радиосвязи. 1997. № 1.
2. **Сирота А. А.** Компьютерное моделирование сложных систем. Учебное пособие. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2006.
3. **Karp S., Gagliardi R. M., Moran S. E. Stotts L. B.** Optical cannels fibers, clouds water, and the atmosphere // Plenum Press, New York, 1988.
4. **Матвеев И. Н., Протопопов В. В., Троицкий И. Н., Устинов Н. Д.** Лазерная локация. М.: Машиностроение, 1984.
5. **Зуев В. Е., Кабанов М. В.** Оптика атмосферного аэрозоля, Ленинград: «Гидрометеоиздат», 1987.
6. **Федоров Б. Ф.** Лазерные приборы и системы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979.