

Ф.Г. Агаев, Х.Г. Асадов, П.Р. Зульфугарлы

Институт космических исследований природных ресурсов Национального
аэрокосмического агентства, Баку, Азербайджанская Республика

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЧАСТОТНОЙ КОММУНИКАЦИИ НИЗКОВЫСОТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В РЕЖИМЕ «ВОЗДУХ – ЗЕМЛЯ»

Посвящена вопросам оптимизации многочастотной коммуникации «воздух – земля» с использованием беспилотных летательных средств. Рассматривается многочастотный режим коммуникации низковысотного БПЛА с наземными приемниками, находящимися на разных расстояниях. Проанализирована известная модель вычисления путевых потерь, учитывающая вероятность наличия или отсутствия прямой видимости, а также потери сигнала при распространении по таким дистанциям. Модель, предложенная Н. Yiang, Z. Zhang, G. Geei, позволяет вычислить суммарные путевые потери, однако не предусматривает реализацию каких-либо оптимизационных процедур. Далее рассматривается возможность введения режима адаптивного изменения несущей частоты в зависимости от дистанции ℓ , т.е. перехода на адаптивный многочастотный режим коммуникации. С учетом известных представлений об использовании вероятностно-сверточной оценки общая вероятность установления связи как при наличии, так и при отсутствии зон с прямой видимостью определена с помощью такой модели. Допускается, что дополнительные потери из-за воздействия факторов окружающей среды отсутствуют. Введен на рассмотрение показатель χ , определяемый в качестве потерь на единицу длины пути. Получено решение, при котором χ достигает минимальной величины. Предложен многочастотный режим коммуникации, когда несущая частота изменяется в зависимости от расстояния, для исследования которого изучается среднеинтегральный показатель χ_{cp} . С учетом дополнительно введенного ограничительного условия сформирован целевой функционал оптимизации. Вычислена экстремаль функционала, согласно которой при полученном решении целевой функционал достигает максимума. Во избежание такого наихудшего режима предложено квазиоптимальное решение, когда несущая частота линейно увеличивается по расстоянию до приемника. Приведено условие достижения выигрыша в таком режиме.

Ключевые слова: оптимизация, БПЛА, многочастотная коммуникация, видимость, радиосигнал, потери сигнала, квазиоптимальное решение, целевой функционал, окружающая среда, наземные станции.

F.G. Agayev, H.H. Asadov, P.R. Zulfugarli

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

OPTIMIZATION OF MULTI-FREQUENCY COMMUNICATION OF LOW ALTITUDE UAV AT REGIME OF AIR-GROUND

The paper is devoted to questions on optimization of multi-frequency communication of air-ground type by utilization of unmanned aerial vehicles. The multi-frequency regime of communication of low altitude UAV with ground receivers located at different distances is considered. The known model for calculation of route losses, taking into account the probability of presence or lack of direct vision and also losses of signal upon propagation on such distances is analyzed. The known model make it possible to calculate the total route losses but don't provide any possibility to realize any optimization procedure. The possibility for realization of regime of adaptation envisaging change of carrying frequency depending of distance, i.e. transfer to adaptive multi-frequency communication regime is considered. Taking into account the known solutions on utilization of probability-convolutional estimates, the total probability of full communication upon presence or lack of direct vision zones is determined by help of such model. It was assumed that additional losses due to effect of environmental factors are lacked. The parameter χ , defined as losses at unit of distance is introduced. The solution is obtained in line of which χ reaches its minimum value. The multi-frequency communication regime is suggested in line which the carrier frequency changes depending on distance. The integrated averaged parameter χ_{cp} is suggested to research this regime. The target optimization functional is formulated taken into account the additionally introduced limitation condition. The solution of optimization task is calculated which provides for maximum of target functional. In order to remove such a worst regime the quazy-optimum regime is suggested in line which the carrier frequency is linearly increases on distance as far as receiver. The condition to reach gain in such regime is described.

Keywords: optimization, UAV, multi-frequency communication, visibility, radiosignal, signal losses, quazy optimum solution, target functional, environment, ground stations.

Введение

Одним из перспективных применений беспилотных летательных аппаратов в городской среде, безусловно, является использование их в целях оповещения населения в условиях чрезвычайных ситуаций, когда наземные службы оповещения не справляются со своей задачей. БПЛА могут быть полезными при анализе и сборе информации о ЧП, оценке степени повреждений, организации операций по поиску и спасению людей [1–5]. Для успешного решения указанных задач в городской среде должны быть разработаны модели коммуникации БПЛА с наземными станциями с учетом закономерностей распространения радиосигналов в городской среде.

Известны многие модели коммуникации в режиме «воздух – земля», пригодные для оценки работы БПЛА в качестве коммуникационной сети. Такие модели можно разделить на стохастические и детерминированные. Геометрические стохастические модели были рассмотрены в работах [6–10]. Детерминированные модели были изложены в работах [11–13].

В работе [14] предложена статистическая модель для прогнозной оценки потерь сигнала в пути между низковысотным БПЛА и наземной станцией. Согласно предложению авторов этой работы, наземные приемники могут располагаться в таких зонах, где прием сигнала осуществляется с использованием прямых, отраженных и дифрагированных сигналов.

При этом приемники сигнала от БПЛА разделены на три группы, где в первую группу входят приемники, имеющие прямую видимость с БПЛА; во вторую группу входят приемники, не имеющие прямую видимость с БПЛА, однако имеющие хороший прием по отраженным или дифрагированным сигналам. В третью группу были включены приемники, у которых сигнал был сильно ослаблен из-за многократных отражений и дифракций. Согласно работе [14], общее количество таких приемников составляло всего 3 % от общего количества 37 000 единиц. На основе вышеизложенного в работе [14] была предложена следующая модель оценки потерь радиосигнала коммуникации между низковысотным БПЛА и приемником:

$$L(h, R) = P(\text{LOS})L_{\text{LOS}} + P(\text{NLOS})L_{\text{NLOS}}, \quad (1)$$

где

$$P(\text{LOS}) = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \left[\frac{180}{\pi} \theta - \alpha\right]\right)}; \quad (2)$$

$$L_{\text{LOS}}(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{4\pi f_c l}{c}\right) + \xi_{\text{LOS}}; \quad (3)$$

$$L_{\text{NLOS}}(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{4\pi f_c l}{c}\right) + \xi_{\text{NLOS}}, \quad (4)$$

где l – расстояние между БПЛА и приемником; $P(\text{LOS})$ – вероятность наличия прямой видимости между БПЛА и приемником; $P(\text{NLOS})$ – вероятность отсутствия такой видимости, при этом $P(\text{LOS}) + P(\text{NLOS}) = 1$; θ – угол высоты БПЛА; L_{LOS} и L_{NLOS} – усредненные значения путевых потерь на путях LOS и NLOS; α , β – постоянные величины; d – расстояние между БПЛА и приемником; f_c – частота несущего сигнала.

В модели (1)–(4) авторы предположили, что все пользователи находятся на открытой местности. При низкой высоте полета БПЛА путевые потери между БПЛА и приемником уменьшаются, однако вероятность наличия прямой видимости между ними также падает. В свою очередь, при увеличении высоты полета путевые потери увеличиваются, а вероятность прямой видимости растет (рис. 1).

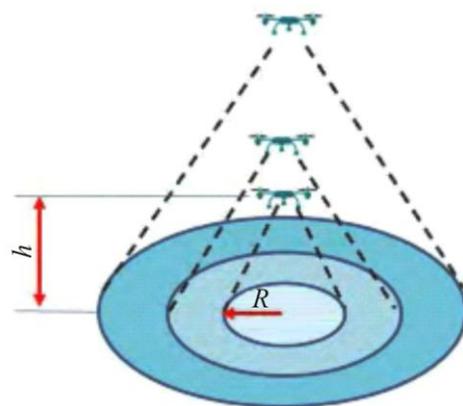


Рис. 1. Иллюстрация соотношения между высотой полета БПЛА, позицией приемника, длиной пути между ними и вероятностью прямой видимости

Таким образом, модель, предложенная в работе [14], позволяет вычислить суммарные

путевые потери, однако не предусматривает реализацию каких-либо оптимизационных процедур. Далее в настоящей статье рассматривается возможность введения режима адаптивного изменения несущей частоты в зависимости от дистанции ℓ , т.е. перехода на адаптивный многочастотный режим коммуникации

Предлагаемый метод

С учетом вышеизложенных положений теории авторов работы [10] модель (1) представим в виде

$$L(\ell, R) = P_{\text{LOS}}(\ell)L_{\text{LOS}}(\ell) + [1 - P_{\text{LOS}}(\ell)]L_{\text{NLOS}}(\ell). \quad (5)$$

При этом допускаем, что $\xi_{\text{LOS}} = \xi_{\text{NLOS}} = 0$, т.е. дополнительные потери из-за воздействия факторов окружающей среды отсутствуют.

В этом случае из формул (3) и (4) получим

$$L_{\text{LOS}}(\ell) = L_{\text{NLOS}}(\ell) = L(\ell). \quad (6)$$

С учетом формул (5) и (6) запишем

$$L(\ell, R) = L(\ell).$$

Введем на рассмотрение показатель χ , определяемый в качестве потерь на единицу длины пути:

$$\chi = \frac{L(\ell)}{\ell} = \frac{20}{\ell} \log\left(\frac{4\pi f_c \ell}{c}\right). \quad (7)$$

Усредним показатель χ по интервалу длины путей $\ell = (0 \dots \ell_{\text{max}})$. Имеем

$$\chi_{\text{cp}} = \int_0^{\ell_{\text{max}}} \frac{20}{\ell} \log\left(\frac{4\pi f_c \ell}{c}\right) d\ell.$$

Покажем, что сама величина χ имеет экстремальный характер. Имеем

$$\frac{d\chi}{d\ell} = -\frac{20}{\ell^2} \log\left(\frac{4\pi f_c \ell}{c}\right) + \frac{20}{\ell^2 \ln e}. \quad (8)$$

Из условия $\frac{d\chi}{d\ell} = 0$ с учетом формулы (8) находим

$$\ell = \frac{c \cdot 10^{1/\ln e}}{4\pi f_0}. \quad (9)$$

При этом решение формулы (9) дает минимальную величину χ , так как вторая производная формулы (7) по ℓ всегда является положительной величиной.

Рассмотрим многочастотный режим коммуникации, когда несущая частота изменяется в зависимости от ℓ , т.е. имеем

$$f_{ci} = f_c(\ell_i), \quad i = \overline{(1, n)}. \quad (10)$$

Условно приняв выражение (8) в качестве непрерывной и дважды дифференцируемой функции, χ_{cp} определим как

$$\chi_{\text{cp}} = \int_0^{\ell_{\text{max}}} \frac{20}{\ell} \log\left(\frac{4\pi f_c(\ell)\ell}{c}\right) d\ell. \quad (11)$$

Применительно к функции $f_c(\ell)$ введем следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{\ell_{\text{max}}} f_c(\ell) d\ell = C; \quad C = \text{const}. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) сформируем следующий функционал $F(f_c(\ell))$:

$$F(f_c(\ell)) = \int_0^{\ell_{\text{max}}} \frac{20}{\ell} \log\left(\frac{4\pi f_c(\ell)\ell}{c}\right) \times d\ell - \lambda \left[\int_0^{\ell_{\text{max}}} f_c(\ell) d\ell - C \right]. \quad (13)$$

Согласно источнику [15], оптимальная функция $f_c(\ell)_{\text{opt}}$, приводящая функционал (11) к экстремальной величине, должна удовлетворить условию

$$\frac{\partial F(f_c(\ell))}{\partial f_c(\ell)} = 0. \quad (14)$$

С учетом формул (13) и (14) получим

$$\frac{20}{f_c(\ell)\ell \cdot \ln e} - \lambda = 0. \quad (15)$$

Из формулы (15) имеем

$$f_c(\ell) = \frac{20}{\lambda \ell \cdot \ln e}. \quad (16)$$

С учетом формул (12) и (16) имеем

$$\int_0^{\ell_{\text{max}}} \frac{20}{\lambda \ell \cdot \ln e} d\ell = C. \quad (17)$$

Из выражения (17) находим

$$\lambda = \int_0^{\ell_{\max}} \frac{d\ell}{C \ln e} = \lambda_0. \quad (18)$$

Таким образом, из формул (16) и (18) имеем

$$f_c(\ell)_{\text{opt}} = \frac{20}{\lambda_0 \ell \cdot \ln e}. \quad (19)$$

Проверка показывает, что при решении уравнения (21) функционал $F(f_c(\ell))$ достигает максимума, так как вторая производная интегранта в выражении (11) по $f_c(\ell)$ всегда отрицательна.

В качестве квазиоптимального решения можно рассмотреть квазиоптимальное решение $f_c(\ell)_{kv}$:

$$f_c(\ell)_{kv} = k\ell. \quad (20)$$

С учетом выражений (19) и (20) можно показать, что выигрыш в уменьшении показателя χ будет достигаться при соблюдении условия

$$k < \frac{20}{\lambda_0 \ell_{\max}^2 \cdot \ln e}.$$

Заключение

Проанализирован предлагаемый многочастотный режим коммуникации низковысотного БПЛА с наземными приемниками, находящимися на разных расстояниях. Проанализирована известная модель вычисления путевых потерь, учитывающая вероятность наличия или отсутствия прямой видимости, а также потери сигнала при распространении по таким дистанциям. Показано, что вновь введенный показатель χ , определяющий потери на единицу длины пути, при определенных условиях достигает минимума.

Вместе с тем при переходе на многочастотный режим коммуникации, т.е. при изменении несущей частоты в зависимости от удаленности приемника, обнаруживается наилучший режим, когда для определенного подкласса функции зависимости несущей частоты от расстояния достигается максимальная величина среднеинтегрального значения вновь введенного показателя χ . Во избежание такого наилучшего режима рассматривается квазиоптимальное решение, когда несущая частота линейно увеличивается по расстоянию до приемника. Приведено условие достижения выигрыша в таком режиме.

Библиографический список

1. Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use // *Remote Sens.* – 2012. – Vol. 4, no. 6. – P. 1671–1692. DOI.org/10/3390/rs4061671
2. Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the wairakei – tauhara geothermal field / A. Nishar, S. Richards, D. Breen, J. Robertson, B. Breen // *Renewable Energy.* – 2016. – Vol. 86. – P. 1256–1264. DOI.org/10.1016/j.renene.2015.09.042
3. Harvey M.C., Rowland J.V., Luketina K.M. Drone with thermal infrared camera provides high resolution georeferenced imagery of the waikite geothermal area // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 2016. – Vol. 325. – P. 61–69.
4. Niethammer U., James M.R., Rothmund S. UAV-based remote sensing of the super-sauze landslide: evaluation and results // *Engineering Geology.* – 2012. – Vol. 128. – P. 2–11.
5. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review ISPRS // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2014. – Vol. 92. – P. 79–97.
6. Li Y., Cheng X. Modelling and simulation for UAV – aided vehicular MIMO communication channels // *IET Commun.* – 2019. – Vol. 13(18). – P. 3044–3051.
7. Jiang H., Zhang Z., Wu L. Three – dimensional geometry – based UAV – MIMO channel modeling for A2G communication environments // *IEEE Commun. Lett.* – 2018. – Vol. 22(7). – P. 1438–1441.
8. Cheng X., Li Y. A 3-D geometry – based stochastic model for UAV – MIMO wideband nonstationary channels // *IEEE Internet Things J.* – 2018. – Vol. 6(2). – P. 1654–1662.
9. Jiang H., Zhang Z., Gui G. Three – dimensional non – stationary wideband geometry – based UAV channel model for A2G communication environments // *IEEE. Access.* – 2019. – Vol. 7. – P. 26116–26122.
10. Zhang X., Cheng X. Three – dimensional non – stationary geometry – based stochastic model for UAV – MIMO rician fading channels // *IET Commun.* – 2019. – Vol. 13(16). – P. 2617–2627.

11. Feng Q., McGechan J., Tameh E.K. Path loss models for air – to – ground radio channels in urban environments // *Vehicular Technology Conf. VTC 2006 – Spring IEEE 63rd*. – May 2006. – Vol. 6. – P. 2901–2905.
12. Al – Hourani A., Kandeepan S., Jamalipour A. Modeling air – to – ground path loss for low altitude platforms in urban environments // *Global Communications Conf. (GLOBECOM)*. Austin 2014. – TX, USA, 2014. – 7 p. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037248
13. Al – Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage // *IEEE Wirel Commun Lett.* – 2014. – Vol. 3(6). – P. 569–572.
14. Shakhatareh H. UAVs: A survey on civil applications and key research challenges // *IEEE Access.* – 2019. – Vol. 7. – P. 48572–48634.
15. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 472 с.

References

1. Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned Aircraft Systems in Remote sensing and Scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sens.* 2012, vol. 4, no. 6, pp. 1671-1692. DOI.org/10/3390/rs4061671
2. Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., Breen B. Thermal Infrared imaging of Geothermal Environments and by an unmanned Aerial Vehicle (UAV): A case Study of the Wairakei – Tauhara Geothermal Field. *Renewable Energy.* 2016, vol. 86, pp. 1256-1264. DOI.org/10.1016/j.renene.2015.09.042
3. Harvey M.C., Rowland J.V., Luketina K.M. Drone with Thermal Infrared Camera provides high Resolution georeferenced Imagery of the Waikite Geothermal Area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2016, vol. 325, pp. 61-69.
4. Niethammer U., James M.R., Rothmund S. UAV-based remote sensing of the Super-sauze Landslide: Evaluation and Results. *Engineering Geology.* 2012, vol. 128, pp. 2-11.
5. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review ISPRS. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 2014, vol. 92, pp. 79-97.
6. Li Y., Cheng X. Modelling and simulation for UAV – aided vehicular MIMO communication channels. *IET Commun.* 2019, vol. 13(18), pp. 3044-3051.
7. Jiang H., Zhang Z., Wu L. Three – dimensional geometry – based UAV – MIMO channel modeling for A2G communication environments. *IEEE Commun. Lett.* 2018, vol. 22(7), pp. 1438-1441.
8. Cheng X., Li Y. A 3-D geometry – based stochastic model for UAV – MIMO wideband nonstationary channels// *IEEE Internet Things J.* 2018, vol 6(2), pp. 1654-1662.
9. Jiang H., Zhang Z., Gui G. Three – dimensional non – stationary wideband geometry – based UAV channel model for A2G communication environments. *IEEE Access.* 2019, vol. 7, pp. 26116-26122.
10. Zhang X., Cheng X. Three – dimensional non – stationary geometry – based stochastic model for UAV – MIMO rician fading channels. *IET Commun.* 2019, vol. 13(16), pp. 2617-2627.
11. Feng Q., McGechan J., Tameh E.K. Path loss models for air – to – ground radio channels in urban environments. *Vehicular Technology Conf.* 2006. VTC 2006 – Spring IEEE 63rd, vol. 6, pp. 2901-2905.
12. Al – Hourani A., Kandeepan S., Jamalipour A. Modeling air – to – ground path loss for low altitude platforms in urban environments. *Global Communications Conf (GLOBECOM)*. Austin 2014. TX, USA, 2014. 7 p. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037248
13. Al – Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage. *IEEE Wirel Commun Lett.* 2014, vol. 3(6), pp. 569-572.
14. Shakhatareh H. UAVs: A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access.* 2019, vol. 7, pp. 48572–48634.
15. Elsgolts L.E. Differential equations and variational calculation. Moscow: Nauka, 1974. 472 p.

Об авторах

Агаев Фахраддин Гюльали оглы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор, Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства (AZ1115, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С.С. Ахундова, д. 1; e-mail: DIRECTOR-TEKTI@MAIL.RU).

Асадов Хикмет Гамид оглы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор, Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического

агентства (AZ1115, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С.С. Ахундова, д. 1; e-mail: asadzade@rambler.ru).

Зульфугарлы Пери Расим гызы (Баку, Азербайджанская Республика) – аспирант, Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства (AZ1115, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С.С. Ахундова, д. 1; e-mail: peri.rzayeva30@gmail.com).

About the authors

Fakhraddin G. oglu Agayev (Baku, Azerbaijan Republic) – Professor, Doctor of Technical Sciences, Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency (1, S.S. Akhundov st., Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic, e-mail: DidkovskiyAA@yandex.ru).

Hikmat H. oglu Asadov (Baku, Azerbaijan Republic) – Professor, Doctor of Technical Sciences, Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency (1, S.S. Akhundov st., Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic, e-mail: asadzade@rambler.ru).

Peri R. gizi Zulfigarli (Baku, Azerbaijan Republic) – PhD Student, Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency (1, S.S. Akhundov st., Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic, e-mail: peri.rzayeva30@gmail.com).

Получено 29.05.2021